



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ – ШТИП
ТЕХНОЛОШКО - ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИНДУСТРИСКИ ДИЗАЈН НА ТЕКСТИЛ
ШТИП

Симона Насева

ПРИМЕНА НА ТЕХНИЧКИ ВЛАКНА ЗА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ: ДОБИВАЊЕ И
КАРАКТЕРИЗАЦИЈА

МАГИСТЕРСКИ ТРУД

Штип, 2015

Симона Насева

**Примена на технички влакна за композитни цевки: добивање и
карактеризација**

Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Комисија за оценка и одбрана

Ментор:

Д-р Винета Сребренкоска

Вонреден професор на Технолошко технички факултет, Универзитет Гоце Делчев - Штип,

Член:

Д-р Димко Димески

Вонреден професор на Технолошко технички факултет, Универзитет Гоце Делчев - Штип,

Член:

Д-р Светлана Ристеска

Вонреден професор на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп,

Научно поле:

Текстилно инженерство (223)

Научна област:

Текстилни и технички влакна (22300),

Хемија на текстилот (22302)

Датум на одбрана:

ПОСВЕТА И БЛАГОДАРНОСТ

Чест и задоволство ми е да изразам искрена и огромна благодарност на мојата менторка проф. д-р Винета Сребренкоска за неизмерна и безрезервната поддршка во текот на целокупното мое студирање, дипломирање и магистрирање, како и за поддршката и стручните совети во текот на изработката на магистерската работа за укажаната помош, стручните совети, изборот на методите и насоките како и конечното оформување на овој магистерски труд.

Благодарност до Институтот за современи композити и роботика во Прилеп за излегување во пресрет и поддршка во моето истражување.

На крај сакам да изразам благодарност до моето семејство кое безрезервно ме поддржуваше и помагаше при изработката на магистерскиот труд.

Рецензирани и објавени трудови

1. Naseva, Simona and Srebrenkoska, Vineta and Risteska, Svetlana and Stefanoska, Maja and Srebrenkoska, Sara (2015) [Mechanical properties of filament wound pipes: effects of winding angles.](#) Quality of Life, 6 (1-2). pp. 10-15. ISSN 1986-602X.
2. Srebrenkoska, Vineta and Zezova, Silvana and Naseva, Simona (2015) [Hoop tensile properties of filament wound pipes.](#) Machines, Technologies, Materials, 9 (11). pp. 28-31. ISSN 1313-0226.
3. Pop Metodjeva, Biljana and Zhezhova, Silvana and Srebrenkoska, Vineta and Naseva, Simona and Srebrenkoska, Sara (2016) [Design of polymer composite pipes produced by filament winding technology.](#) Machines, Technologies, Materials, 10 (1). pp. 23-26. ISSN 1313-0226.
4. Srebrenkoska, Vineta and Naseva, Simona and Risteska, Svetlana and Stefanoska, Maja and Srebrenkoska, Sara (2015) [Effects of winding angles on mechanical properties of filament wound pipes.](#) In: IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry, 04-06 March 2015, Jahorina, Bosnia and Herzegovina.

ПРИМЕНА НА ТЕХНИЧКИ ВЛАКНА ЗА КОМПОЗИТНИ ЦЕВКИ: ДОБИВАЊЕ И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА

Краток извадок

Во рамките на оваа магистерска работа беше направено истражување за примена на технички влакна во добивање на композитни структури со користење на технологијата на намотување на филаменти. Беа применети стаклени влакна како зајакнувачки материјал во добивањето на полимерни композитни цевки. Беа произведени композитни цевки со различен дизајн т.е. со различни агли на намотување на влакната од 90° , 10° и 45° и беше направена карактеризација на физичко механичките својства на добиените композитни структури. Со помош на сплит – диск тест метода беше тестирана силата на истегнување на прстенести примероци. Беше добиено дека поголемиот агол на намотување на влакната во композитните цевки доведува до поголеми јачини на истегнување. Деструкцијата на влакната и на интерфејсот меѓу влакната и матрицата беше доминантен механизам на кршење кај примероците намотани со агол 90° . Додека деламинација беше забележана кај примероците со помал агол на намотување (10°). Од добиените резултати беше заклучено дека механичките карактеристики на композитните примероци зависат многу од аголот на намотување на влакната при нивно добивање со технологијата на намотување на филаменти. Врз основа на СЕМ анализите беше забележано дека постои добра поврзаност помеѓу влакната и смолата, а на местата на прекин од тестирањето беше забележана одредена деструкција на влакната и на матрицата.

Клучни зборови: стаклени влакна, намотување на влакна, композитни цевки сплит-диск тест.

APPLICATION OF TECHNICAL FIBRE FOR COMPOSITE PIPES: OBTAINING AND CHARACTERIZATION

Abstract

Within the frames of this thesis, the research for the application of technical fibers in obtaining composite structures using the technology of winding filaments was performed. Glass fibers, as a reinforcing material for obtaining polymer composite pipes, were applied. Composite pipes with different design i.e. with different angles of winding the fibers from 90°, 10° and 45° were produced and the physical and mechanical characterization of the obtained composite structures was made. With the assistance of split-disk tests, hoop tensile properties of selected specimens were determined. It was concluded as follows: the bigger the winding angle the higher the hoop tensile properties of filament wound tubular samples. Fiber fracture and fiber-matrix debonding is observed to be the dominant failure mechanisms by samples wound with bigger winding angles of 90°, whereas delamination in addition to these mechanisms is detected by samples with smaller winding angles (10°). From the received results, it is concluded that mechanical properties of composite specimens are depended on the winding angles in filament winding technology. On the basis of the conducted SEM analysis, a good merger between glass fibers and the epoxy matrix was noticed, but cracks within plies and broken fibers were registered, due to the high fiber branching.

Key words: glass fibers, filament winding, composite pipes, split-disk test.

СОДРЖИНА

		Стр.
1.	ВОВЕД	10
2.	ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ	16
2.1.	Композитни материјали - основни дефиниции, својства и примена	16
2.2.	Структурни елементи на композитните материјали	18
2.2.1.	Зајакнувачки материјал	18
2.2.1.1.	Стаклени влакна	21
2.2.1.2.	Јаглородни влакна	26
2.2.1.3.	Полиамидни (најлон) влакна	32
2.2.1.4.	Арамидни влакна	34
2.2.2.	Полимерна матрица	38
2.2.2.1.	Епоксидни смоли	40
2.3.	Технологија на намотување на влакна	45
2.3.1.	Методи за намотување и импрегнација во технологијата за намотување на филаменти	50
2.3.2.	Анализа на композитни цевки произведени со технологија на намотување на филаменти	51
3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ	54
3.1.	Материјали користени за експериментите	54
3.2.	Добивање на композитни цевки	57
3.3.	Определување на јачината на истегнување	60
3.4.	Определување на скенирачки електронски снимки (SEM) на композитните примероци	64
4.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	66

4.1.	Определување на физичко - механички карактеристики на композитните цевки	68
4.1.1.	Определување на содржина на стаклени влакна во композитните примероци	68
4.1.2.	Определување на јачината на истегнување на композитните прстен примероци	71
4.2.	Сканинг електронска микроскопија (СЕМ) на тестираните композитни прстени	81
5.	ЗАКЛУЧОК	84
6.	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	86
	Листа на табели	
	Листа на слики	

1. ВОВЕД (INTRODUCTION)

Материјалите се среќаваат во различни сегменти од нашето живеење, поради што со право може да се каже дека нашето секојдневие е под влијание на материјалите. Практично во секој сегмент од нашиот живот доаѓаме во контакт со различни видови на материјали (во градежништвото, во транспортот, домаќинството). Материјалите треба да исполнат одредени барања за да се дефинира нивната примена. Така, на пример, за одредена намена, материјалите треба да издржат одредено оптоварување, да изолираат или да спроведуваат топлина/електрична енергија, да пренесат или да одбијат светлина и слично. Денес, на инженерите им се на располагање повеќе од 160 000 видови материјали, повеќе од 45 000 синтетички полимери, илјадници лесни легури и голем број композитни материјали. Развојот на материјалите е особено изразен во последните 100 години. Развојот на многу технологии, кои го овозможуваат нашиот современ начин на живеење, е тесно поврзан со развојот и достапноста на одредени материјали. Од илјадниците материјали што ни стојат на располагање, понекогаш е проблем да се направи вистински избор на вистинскиот материјал. Но, секогаш треба да се земат во предвид одредени критериуми според кои ќе се изврши крајниот избор. Прво, потребно е да се дефинираат условите при кои ќе биде применет материјалот, а кои се во директна врска со својствата на материјалот. Второ, потребно е да се земе во предвид можноста за промена на својствата на материјалот за време на неговото користење. Последен, но не помалку важен критериум е цената на чинење на материјалот. Така, може да се најде материјал кој ќе има одлични својства и кој нема да биде премногу скап. Во секој случај, потребно е да се направи компромис со цел да се пронајде оптимално решение за дадени потреби. Со познавањето на различните карактеристики на материјалите, релацијата структура – својства, како и постапките за процесирање на материјалите, може да се направи правилен и сигурен избор на материјали, во согласност со зададените барања [1,2].

Многу современи технологии бараат материјали со невообичаени комбинации на својства кои не можат да бидат исполнети од страна на конвенционалните метални легури, керамиката и полимерните материјали. Во

голем број индустрии потребни се структурни материјали кои што имаат ниска густина, голема јачина, цврстина, отпорност на абразија и удар. Композитните материјали се способни за исполнување на овие барања, поради нивната хетерогена природа. Својствата на композитните материјали се јавуваат како функција од нивните составни конституенти, нивната дистрибуција како и меѓусебната интеракција, па така со нивна комбинација може да се добијат материјали со невообичаена комбинација на својства [2].

Најчесто применувани се композитите со полимерна матрица т.е. полимерните текстилни композитни материјали. Овие композити се состојат од полимерна матрица зајакната со влакна (природни, јаглородни, стаклени, арамидни, борни и др.).

Текстилните композити се составени од текстилни зајакнувачи во комбинација со поврзувачка матрица (обично полимерна). Ова опишува големо семејство на материјали користени за примени под влијание на оптоварување во голем број на индустриски сектори.

Полимерните композитни материјали зајакнати со влакна претставуваат големо семејство на материјали кои се користат како одговорни структури во голем број на индустриски сектори, кои можат да бидат изложени на оптоварување. Терминот текстил се користи за опишување на испреплетени структури кои се состојат од предива, но исто така се однесува и на влакна, филаменти и многу производи направени од нив. Процесите за производство на текстил биле развиени стотици или дури илјада години. Модерните машини за процесите како ткаење, плетење и вплетување во лента работат под автоматска контрола и се способни да обезбедат високо квалитетни материјали во производствен опсег до неколку стотици килограми на час. Некои од овие процеси (особено вплетувањето) може да произведат зајакнувачи директно во форма на конечна (финална) компонента. Значи, таквите материјали може да обезбедат многу добар зајакнувачки медиум за полимерните композити. Полимерните композитни материјали зајакнати со влакна привлекуваат голем интерес и од академската заедница и од индустријата. Ова семејство на материјали врз основа на цената и нивните перформанси, дава големи можности за нивна примена во разни индустрии. Причините за применување на полимерните композитни материјали зајакнати со влакна можат да бидат различни и комплексни, но сепак

примарната компонента за употребата на текстилните зајакнувачи е несомнено цената. Текстилот односно влакната може да се произведуваат во големи количини со разумни трошоци и тоа со користење на современи, автоматизирани производствени техники. Директното користење на влакната или предивото може да биде поевтино во однос на материјалните трошоци, но овие материјали се тешки за ракување и за процесирање до формирање на сложени структурни форми. Композитните материјали зајакнати со влакна се применуваат во многу индустрии како што се: авио индустријата, поморската индустрија, наменската индустрија, транспортната, градежништвото, електроиндустријата, и други. Како пример, голем број на структури за Airbus A380 патнички авион претставуваат полимерни композити зајакнати со влакна, како што се панели за крило произведени врз основа на јаглородни влакна, структури за опашката на авионот и друго. Најголемите произведени полимерни композити зајакнати со влакна се за ветерници за електрична енергија. Други области на примена вклучуваат структури за градежништво, на пример во мостови кои нудат значителни заштеди на трошоците за инсталација поради нивната мала тежина. Постојат бројни примени на овие композити и во автомобилската индустрија како на пример браникот кој е направен од композит врз основа на стаклени влакна и друго. Овие материјали може лесно да се обликуваат во различни форми и големини и поседуваат голема јачина, цврстина и отпорност на корозија. Причината за нивната широка примена најчесто е ниската цена, високата цврстина и едноставните техники за производство [3].

Во зависност од типот, намената и својствата кои треба да ги поседува композитниот материјал постојат повеќе методи и процеси за производство. Една од применуваните технологии за производство на полимерни композитни материјали зајакнати со влакна е „процесот на намотување на филаменти“ (Filament-winding process). Во основа овој процес се состои од прецизно и брзо намотување на зајакнувачки материјал кој е во форма на континуирани влакна (во форма на roving или monofilaments) кој претходно се потопува во када со смола, а потоа се намотува на ротирачки калап (мандрел). За изведување на оваа технологија се користат специјално дизајнирани машини, чија брзина е синхронизирана со брзината на ротација на мандрелот, а исто така нудат и можност за варијација на аглите под кои се намотува зајакнувачот т.е.

влакната. Во зависност од потребата и капацитетот на поодделните производители достапни се машини во различни големини и конфигурации. Машините се компјутерски контролирани и автоматизирани за прецизно положување на точен број на слоеви од зајакнувачот т.е. влакната. Со намотување на влакната се добива можност за производство на краен производ во различна форма (цилиндрична, сферична, конусна и др. форми). Вообичаено овој процес пред се се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и горива, како и за производство на цевки со различен дијаметар (од неколку сантиметри до еден или два метри). Процесот на намотување на влакната (зајакнувач) дава можност дизајнерот да ги креира механичките карактеристики и да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на добиените композитни структури [4].

Материјали кои најчесто се користат при процесот на намотување на влакна се континуирани стаклени, јаглородни или арамидни влакна (зајакнувачка компонента) и термореактивни смолни системи (матрица).

Композитните материјали произведени од долги влакна со голем масен удел во вкупната структура се нарекуваат композити зајакнати со континуирани влакна. Овие композити имаат широка примена во разни области што се должи пред се на нивната анизотропна природа. Ова дава можност за флексибилен дизајн односно менување на одредени карактеристики на композитот во зависност од потребите и условите на експлоатација што не е случај со конвенционалните материјали кои се изотропни.

Постојат бројни параметри кои се предмет на анализа во процесот на намотување на филаменти бидејќи механичките својства на добиените композитни материјали се детерминирани пред се од својствата на нивните одделни конституенти. Основните параметри кои најчесто се регулираат се: бројот на намотани влакна, аголот на намотување, брзината на намотување, брзината на ротација на мандрелот, силата на затегнување на влакната, вискозитетот на смолата и времето на задржување на влакната во смолата т.е. времето на натопување на влакната.

Изборот на постапките и условите на процесирање за добивање на полимерен композитен материјал се од особена важност, бидејќи во голем степен влијаат на својствата на добиениот материјал и цената на крајниот

производ. За сите техники на процесирање на композитните материјали неопходно е при одредена температура и за одредено време да се примени доволен притисок, со цел од течната маса зајакнувач-матрица да се добие димензионо стабилен композит. При добивање на композитни материјали со термореактивна матрица треба да се обезбеди доволно долго време за да заврши процесот на вмрежување и да се добие стабилен производ пред да се извади од калапот, додека пак кога се користи термопластична матрица, со оглед на тоа што материјалот треба само да се олади, времето на задржување во калапот е значително пократко [4,5].

Затоа, особен научен, но и практичен предизвик претставуваат истражувањата за примената на техничките влакна за добивање на композитни материјали, технологиите (оптимални) за нивно добивање како и нивната карактеризација. Техничките влакна можат да се користат како зајакнувачки материјал во различни форми и геометрии со примена на различни технологии за процесирање.

ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Врз основа на теоретски сознанија за примена на техничките влакна за добивање на полимерни композитни структури – композитни цевки со помош на технологијата за намотување на филаменти, како и барањата за развој и примена на такви композитни материјали во разни индустрии, произлезе мотивот и определбата за темата на оваа магистерска работа.

Во рамките на оваа магистерска работа главна цел беше да се направи истражување за примена на технички влакна во добивање на композитни структури со користење на технологијата на намотување на филаменти (filament winding technology). Поточно, цел на истражувањата во рамките на оваа магистерска работа беше да се покаже примената на стаклени влакна како зајакнувачки материјал во добивањето на полимерни композитни цевки. За реализација на поставената цел беа произведени цилиндрични композитни структури со примена на технологијата за намотување на влакна. Притоа, беа произведени композитни цевки со различен дизајн т.е. со различни агли на намотување на влакната и беше направена карактеризација на механичките својства на добиените композитни структури. Преку добивањето на композитни

цевки со различен дизајн беше покажано значењето од примената на техничките влакна во добивање на композитна структура со добри механички карактеристики. Имено, композитните цевки добиени со различен агол на намотување на влакната покажуваат различни карактеристики, а дизајнерот кој работи на композитните материјали ја избира соодветната комбинација на влакната во зависност од поставената крајна цел за нивна примена. Бидејќи во рамките на оваа магистерска работа се анализирани композитни цевки, како карактеристика која беше тестирана во однос на дефинирање на нивниот квалитет беше нивната издржливост на високи притисоци. За ваков тип на композитни структури тоа е карактеристика која најчесто се бара затоа што композитните цевки се наменети да ги заменат корозивните метални цевки за транспорт на течности и гас.

Целата магистерска работа е поделена на неколку делови односно содржи теоретски дел, експериментален дел, резултати и дискусија и заклучок. На почетокот т.е. во теоретскиот (првиот) дел даден е литературен преглед на примената на разни типови на влакна за добивање на композитни структури, објаснета е технологијата за намотување на филаменти, машините, уредите и деловите кои се користат во неа, како и примената на композитни структури добиени со оваа техника. Во експерименталниот (вториот) дел се дадени карактеристиките на одделните конституенти (материјали) кои се користени за добивање на композитните структури, условите за нивно процесирање како и применетите методи за карактеризација на добиените производи. Во третиот дел се претставени добиените резултати и нивна дискусија. На крај сумирани се значајните заклучоци за примената на стаклените влакна во добивање на композитни цевки и за карактеристиките на истите.

Магистерската работа покрај тоа што има научен придонес во истражувањата поврзани со примена на технички влакна во полимерни композитни материјали, исто така има и практичен придонес. Имено, сознанијата добиени од истражувањата може да послужат во сите индустриски капацитети поврзани со добивање и примена на композитни материјали.

1. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ (THEORETICAL PART)

2.1. Композитни материјали - основни дефиниции, својства и примена (Composite materials - basic definitions, properties and application)

За многу современи конструкции потребни се материјали со невообичаена комбинација на својства, кои што не ги нудат металните легури, керамиката и полимерните материјали. Тоа лежи во основата на филозофијата на композитните материјали како повеќефазни системи, чии што својства ги задржуваат својствата на одделните конституенти, но при тоа го надминуваат правилото на смеши. Полимерните композитни материјали припаѓаат на релативно нова група на индустриски композити кои се во употреба повеќе од половина век.

Композитите ги сочинуваат два основни елементи: зајакнувач и матрица или полимерен систем за композити со органска матрица. Важно е да се разбере дека за најголем дел композитни делови, јачината е одредена од зајакнувачот, не од матрицата, иако таа е неопходна во поврзувањето на зајакнувачите-vlakната и го пренесува оптоварувањето меѓу vlakната во сите насоки и меѓуслоеве [6].

Постојат многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглеродните и арамидните vlakна. Матрицата која се наоѓа меѓу vlakната е неопходна за нивното поврзување и го пренесува оптоварувањето меѓу vlakната во сите насоки и меѓуслоеве. Исто така, матрицата ги заштитува vlakната, кои се обично лесно кршливи, од абразија и корозија под дејство на надворешни влијанија. Во зависност од применетиот материјал за матрица, полимерните композити се поделени во две групи: термопластични (thermoplastics) и термореактивни (thermosetting).

Кај термореактивните композити, во текот на процесот на добивање се формира тродимензионална мрежа од вмрежени полимерни синџири. Овој процес е неповратен, па поради тоа по вмрежувањето, кое најчесто се изведува на повисоки температури, тие се претвараат во крути, нетопливи и нерастворливи продукти. Најчесто користени термореактивни матрици се

незаситените полиестерски смоли, винил естерски смолни системи, епоксидните и фенолите смоли.

Термопластичните полимерни композити, пак, при загревање омекнуваат или се топат, а при ладење повторно се стврднуваат. Овој процес може да биде често повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. Типични термопластични матрици кои се користат се: полиамидите, полипропиленот и поликетоните [5,6].

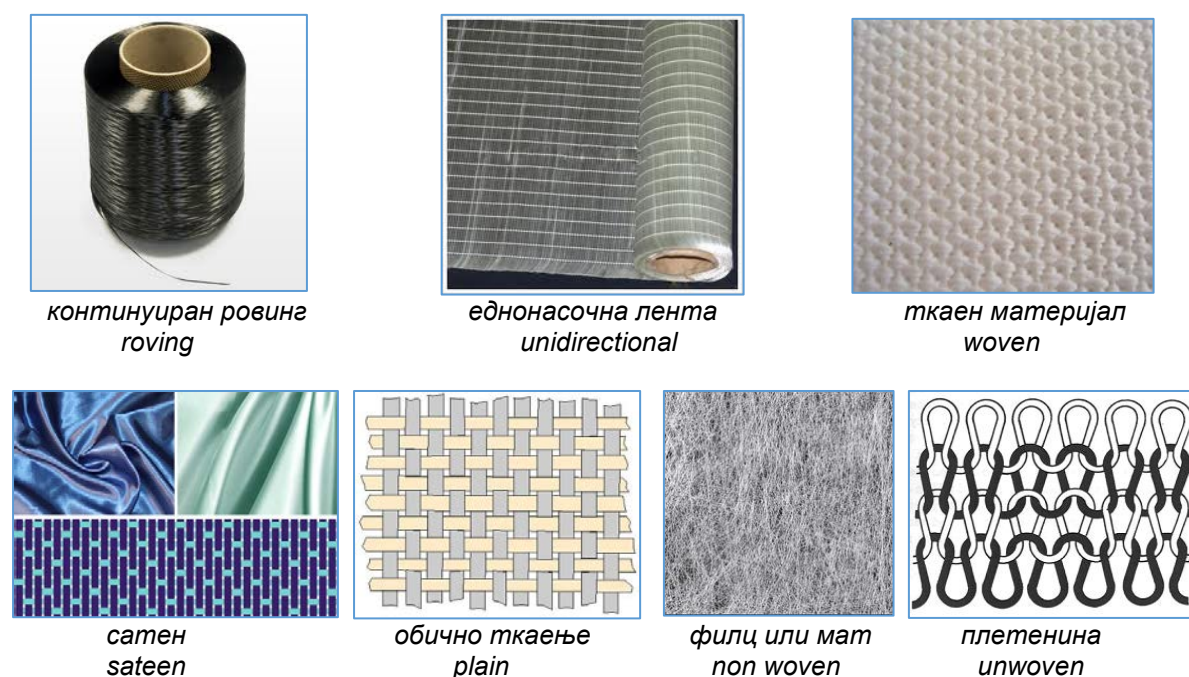
Главните предности на композитните материјали, во споредба со конвенционалните и конкурентни инженерски материјали се следниве: мала тежина, висока специфична јачина и цврстина, добри својства на замор, отпорност на корозија, електрична изолација, звучна и топлинска изолација, лесни за дизајнирање на комплексни форми, лесно одржување. Се разбира, постојат и одредени недостатоци, како што се, на пример, ниската температурна толеранција и високата цена. Меѓутоа, карактеристично е тоа што сите презентирани предности се во зависност од изборот на конститутивните материјали и од применетиот метод на производство и доколку не се направи правилен избор, крајниот резултат може да биде незадоволувачки. Повеќе методи за производство на полимерни композитни материјали се достапни и применливи, а изборот зависи од видот на материјалот (термореактивен или термопластичен), обликот, перформансите и бројот на производни единици.

Полимерните композитни материјали широко се користат во специјални области на современата техника. Зајакната пластика на основа на стаклени, полимерни, јаглородни и керамички влакна наоѓа се поширока примена во авиоиндустријата, автомобилската индустрија, машинството, градежната индустрија итн. Значајно истражување, развој и напредок е остварен исто така и во сферата на композитните материјали со метална и керамичка матрица (Metal Matrix and Ceramic Matrix Composites), но композитите со органска матрица (Organic Matrix Composites) имаат многу пораспространета примена. Зајакнатата пластика поседува висока јачина и тврдина, ниска густина, отпорност на влага и хемикалии, корозиона стабилност [6,7].

2.2. Структурни елементи на композитните материјали (Structural elements of composite materials)

2.2.1. Зајакнувачки материјал (Reinforcing material)

Постојат многу материјали кои можат да се користат како зајакнувачи. Во технологиите на современите композити доминираат: стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Доколку е потребно, за одредена апликација како компонента може да се користи и хибрид на два или повеќе зајакнувачи. Зајакнувачите можат да бидат достапни во различни форми: како континуиран ровинг (tow, roving), еднонасочна лента на паралелни, континуирани влакна (unidirectional), ткаен материал (woven) во различни геометрии, како сатен (satin) и обично ткаење (plain), плетенина (unwoven), филц или мат (nonwoven) - со случајно ориентирани влакна [6]. Сите овие форми обезбедуваат извесна предност, но и ограничување на композитната структура во однос на процесот на обликување, економичноста и естетиката [8].



Слика 2.1. Различни форми на зајакнувачки текстилен материјал

Figure 2.1. Various forms of reinforcement textile material

Предностите на различни типови на влакна се претставени со следниве основни карактеристики:

1. Glass - Стаклени влакна = Економичност
2. Carbon - Јаглеродни влакна = Крутост
3. Aramid - Арамидни влакна = Отпорност на удар
4. Boron = Висок модул на еластичност
5. Silicon carbide = издржливост на висока температура

Првите три фамилии на зајакнувачки материјали се одликуваат со ниска густина и висока јачина. Стаклените влакна се ефикасни од аспект на однос јачина/тежина, и се многу економични. Јаглеродните влакна имаат повисоки модули и јачини. Нивните специфични модули се повисоки од челикот, но се поскапи зајакнувачи. Кевларот како органско арамидно влакно, обезбедува добри својства на истегнување и одлична отпорност на удар [6].

Споредбата на механичките својства на најчесто користените типови на зајакнувачи е дадена во табела 2.1.

Табела 2.1. Споредба на механичките својства на комерцијално достапни зајакнувачи влакна

Table 2.1. A comparison of mechanical properties of commercially available reinforcements

Вид на влакно	Густина/ Density, kg/m ³	Јачина на Истегнување/ Tensile strength, MPa	Модул при Истегнување/ Modulus, GPa	Издолжување до кинење/ Elongation, %	Апсорпција на влага/ Absorption of moisture, %
Стаклени - Е влакна	2,56	2000	76	2,6	0,1-0,4
Јаглеродни	1,75	3400	230	3,4	0,04-0,1
Арамидни (Кевлар)	1,45	3000	130	2,3	0,3-0,8

Својствата на композитниот материјал зависат од својствата на конститутивните фази, нивните удели, геометријата на зајакнувачот и адхезијата помеѓу зајакнувачот и матрицата. Геометријата подразбира форма, големина, распределба и ориентација на зајакнувачот во матрицата. Кај сите

видови композитни материјали механизмот на зајакнување зависи од геометријата на зајакнувачот. Затоа, покрај другите начини на класификација на композитните материјали, се применува и класификацијата според зајакнувачот, па така имаме композити со дисперзни честици, со кратки и со бесконечни влакна [6,7,8]:

Табела 2.2. Класификација на композитните материјали

Table 2.2. Classification of composite materials

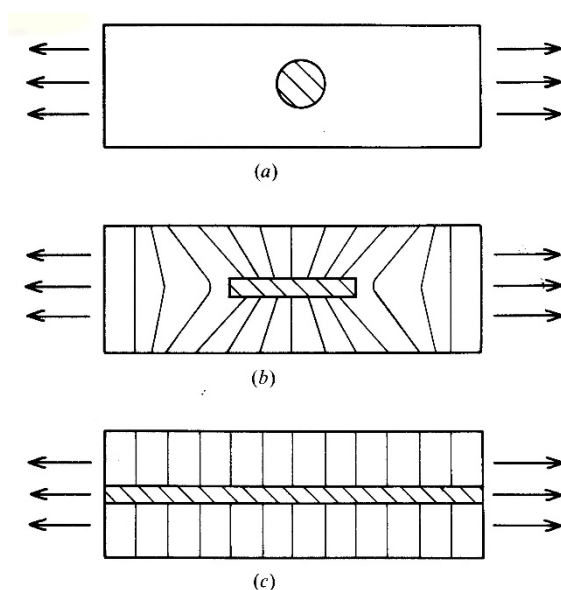
КОМПОЗИТИ					
Зајакнати со честици		Зајакнати со влакна		Структурни	
Големи честици	Дисперзно зајакнати	Континуирани (насочени)	Дисконтинуирани (кратки влакна)		Ламинати
			насочени	случајно ориент.	
					Сендвич структури

При оваа класификација основен параметар е соодносот на максималната спрема минималната димензија на зајакнувачот, т.н. карактеристичен однос (aspect ratio). Композитите со дисперзни честици претставуваат еден од крајните случаи кога тој однос е еднаков на единица, додека оние со бесконечни влакна се другиот краен случај кога односот е еднаков на бесконечност. Композитите со кратки влакна, кај кои односот на должината кон пречникот обично е од 10 до 1000, се наоѓаат помеѓу овие два крајни случаи. Потенцијалниот ефект на зајакнување кај трите типа композити може да се оцени од слика 2.2 [4].

Дисперзните честици практично не можат да имаат примарен зајакнувачки ефект, затоа што само мал дел од приложеното напрегање врз матрицата може да биде пренесено на честицата, а рушењето се случува или по границата на фазите или во матрицата, при услов честиците на полнилото да се појаки од матрицата. Притоа може да се набљудува секундарен ефект на зајакнување, бидејќи ако честиците се поцврсти од матрицата (што е најчест случај) тогаш тие ќе пречат на попречното собирање на матрицата (еластично

или пластично). Во резултат на ова доаѓа до обемно-напрегната состојба, што и го зголемува нивото на рушечко напрегање при растегнување.

Кај бесконечните влакна, ако се занемари ефектот на нивните краеве, може да се претпостави дека и влакната и матрицата се деформираат исто, а приложеното напрегање се дели меѓу двете фази пропорционално на нивните релативни површини на попречен пресек и модулите на еластичност. Во тој случај внесувањето голем волуменски удел на јаки високомодулни влакна во нејака пластична матрица ќе овозможи во принцип целосна реализација на својствата на влакната [6-8].



Слика 2.2. Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на полнилото врз распределбата на напрегањата во матрицата: а- $l/d=1$, сферна честичка; б-кратко крто влакно, $l/d=10-1000$; с-бесконечно крто влакно, $l/d=\infty$

Figure 2.2. Influence of the characteristic relation l/d of the particles on the distribution of stresses in the matrix: a) $l/d = 1$ spherical particle; b) short fiber, $l/d = 10-1000$; c) infinitely fiber, $l/d = \infty$

2.2.1.1. Стаклени влакна (Glass fibers)

Стаклените влакна се најмногу користените зајакнувачки влакна во индустријата на композитните материјали. Речиси со 90% учествуваат како

зајакнувачи на термореактивните смоли. Се применуваат во вид на ровинг (континуирани струкови), сечкани струкови, ткаенини, мат (врз база на континуирани и сечкани влакна) и во мелена форма. Подолгите влакна покажуваат поголема јакост, додека најјаките се континуираните влакна. Претежно се произведуваат како Е (electrical grade) тип на влакна, додека појакот, С тип на влакна, (за една третина се појак од Е типот), заради високата цена на чинење се произведува во значително помало количество и тоа само за специјална намена. Други типови на стаклени влакна кои имаат ограничена примена се: D (dielectric), C (chemical), A (alkaline) и др. [4,9,10].

Табела 2.3. Типови на стаклени влакна

Table 2.3. Types of glass fibers

Ознака/ Letter	Значење/ Meaning	Својства/ Properties
E (electrical)	електрично	Електро-изолационо/ Electrical insulation
S (strength)	јачина	Голема јачина/ Great strength
C (chemical)	хемиско	Хемиски отпорно/ Chemical resistant
M (modulus)	модул	Круто/ Rigid
A (alkali)	алкално	Алкално/ Alkali
D (dielectric)	диелектрично	Ниска диелектрична константа/ Low dielectric constant

На пазарот постојат два типа на Е-стаклени влакна. Обичното Е-стаклено влакно содржи 4-6 % бор оксид. Строгите закони за заштита на околината бараат елиминација на борот од гасните продукти кои се емитуваат од растопите што содржат бор. За таа цел потребно е вградување на скап систем кој ќе ја спречи емисијата на бор. Во последно време Е-стаклените влакна без бор или флуор се повеќе се применуваат во индустријата на стаклени влакна заради пониската цена и заради тоа што нема издвојување на штетни пареи при топењето на материјалот. Овие (безборни) стакла имаат дури и поголема хемиска постојаност кон кисели раствори отколку стаклото што содржи бор, но исто така имаат и повисока температура на топење. Заради одличната хемиска отпорност, посебно во кисела средина, формираат посебна подкласа од Е-

стаклото наречена ECR (chemically resistant). Без разлика на која варијанта му припаѓаат сите Е-стаклени влакна се за општа намена бидејќи нудат добра јачина при ниска цена. Стаклените влакна на пазарот се среќаваат како: ровинг, ткаенина, ткаен ровинг, мат, предиво, конец, стаклена волна, сечкани влакна и сл.

Хемиски својства

Имајќи во предвид дека секој оксид кој влегува во состав на стаклото има свој придонес кон одредена карактеристика на стаклото, врз база на хемискиот состав на стаклото, може да се процени придонесот на дадениот оксид врз севкупните карактеристики на стакленото влакно. Во табела 3 е даден составот на некои типови влакна.

Табела 2.4. Состав на некои типови стаклени влакна (% теж.)

Table 2.4. Composition of some types of glass fiber (% mas)

Влакно/ Fiber	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
E	52-56	4-6	12-15	21-23	0,4-4	0,2-0,5	0-1	0,2-0,4	0,2-0,7
E- без бор	59,0	-	12,1	21,6	3,4	1,5	0.9	0,2	-
D	74,5	22,0	0.3	0,5	-	-	<1,3	-	-
S	60-65	-	23-25	0-9	6-11	-	0-0,1	0-0,1	-

Така на пример, SiO₂ се одликува со многу мала термичка експанзија додека Na₂O, K₂O – со висока експанзија и со слаба отпорност на дејството на водата, CaO, MgO – со подобра постојаност на дејството на вода, киселини и бази. Хемиското, С – стакло, т.е. натриум- калциум бор силикатното стакло се одликува со извонредна хемиска постојаност спрема дејството на киселините и базите.

Физички и механички својства

Високиот однос на јачина спрема тежина ги прави стаклените влакна супериорни материјали за апликации каде се бараат високи јакостни карактеристики, а притоа мала тежина. Сите типови на стаклени влакна се одликуваат со висок коефициент јачина на истегнување/маса иако стаклените спаѓаат во синтетички неоргански влакна со највисока густина. Модулот и јачината на истегнување на стаклените влакна зависи од хемиската композиција на влакната. Внесувањето на модификатори во мрежата како што се алкални елементи или нивни оксиди резултира со намалување на модулот и јачината на истегнување. Модулот на типичните стаклени влакна е од редот 70-80 GPa. За типично Е-влакно јачината на истегнување е околу 3,5 GPa. Чисто силициумови филаменти покажуваат максимална јачина од 7 GPa. Борните, фосфатните и оловните силикатни стакла типично имаат јачина од приближно 1-2 GPa. S-стаклото има значително поголема содржина на силициум, алуминиум и магнезиум оксид од Е-стаклата и е за 40-70 % појакано од нив. Стаклени влакна со голема јачина имаат голема содржина на SiO_2 во споредба со другите типови на стаклени влакна. Заради тоа овие стаклени влакна имаат значително повисока температура на топење од конвенционалните Е-стаклените влакна. Стаклените влакна со најголема јачина на истегнување се познати како S-2 стаклени влакна и имаат за околу 50 % поголема јачина на истегнување во однос на стандардните Е-стаклените влакна. Поради високата цена овие стаклени влакна имаат ограничена апликација и се користат само за специјални цели каде се бара многу висока термичка издржливост и јачина. Терминот високо-перформансни стакла се користи за да се карактеризираат овие стаклени влакна. Во табела 4 се претставени некои од најзначајните физички и механички својства на стаклените влакна.

Отпорноста на дејството на влагата им е одлична, тие не бабрат, не се издолжуваат, не се распаѓаат и не трпат никакви хемиски промени кога се влажни. Со исклучок на дејството на јаките бази и флуороводородната киселина, имаат одлична корозивна отпорност [4,6,11].

Табела 2.5. Физички и механички и особини на стаклени влакна

Table 2.5. Physical and mechanical properties of glass fibers

Влакно/ Fibers	Густина/ Density, g/cm ³	Јачина на истегнување/ Tensile strength, MPa	Модул/ Modulus, GPa	Издолжување при прекин/ Elongation at break, %	Точка на омекнување/ Point of softening, °C
E	2,54	3100-3800	76-78	4,5-4,9	830-860
E-без бор	2,62	3100-3800	80-81	4,6	916
D	2,16	2410	-	-	970
S	2,48	4380-4590	88-91	5,4-5,8	760

Термички својства

Стаклото е неоргански материјал и не гори. Може да се употребува на зголемена температура. Стаклените влакна задржуваат 75 % од својата јачина на истегнување на 340°C дури и на температури поголеми од оваа задржуваат добар дел од својата јачина на истегнување. Имаат добра термичка спроводливост и способност за брза дистрибуција на топлина.

Електрични својства

По природа стаклото е природен електроизолационен материјал. Електричните особини на стаклените влакна имаат значаен придонес за високите перформанси на композитот во електричните апликации. "Е" стаклото е развиено да го подобрува електричниот отпор на пресуваните финални делови. "D" стаклото има супериорни електрични особини во однос на "Е" стаклото.

Првото стакло што било специјално развиено за производство на континуирани филаменти било алуминиум-бор-силикатното (или безалкалното), примарно наменето за електроизолација. Означено како Е стакло, тоа се покажало како добро прилагодливо за низа технолошки процеси и продукти, од декоративни до структурни апликации, така што станува познато како стандардно текстилно стакло. Од целокупното производство на континуирано стакло, денес најголем дел отпаѓа на Е стаклото. Неговиот

состав може да варира, но промените во означениот опсег немаат влијание врз неговите електрични и механички особини [4, 12,13].

Првата значајна комерцијална примена на стаклени влакна е за филтрација на воздухот. Стаклените влакна доминираат на пазарот веќе неколку децении. Иако во последната деценија пониските трошоци на органските полимерни влакна ги заменија стаклените влакна во повеќето системи за филтрација на воздухот во зградите и комерцијалните апликации, пазарот за топлинска изолација продолжува да расте, воден од желба за енергетски поефикасни згради. Овој пазар е всушност и најголем корисник (по маса) на стаклени влакна од сите видови. Енергијата потребна за производство на производи од стаклени влакна за топлинска изолација е помала во споредба со енергијата која може да се заштеди за греење/ ладење на еден простор во текот на неколку години. Стаклената волна денес претставува еден од најпознатите енергетски ефикасни производи за широка потрошувачка на пазарот.

Вториот по големина пазар (по маса) на стаклените влакна е нивната примена како зајакнувачка компонента во композитните материјали. Речиси со 90% учествуваат како зајакнувачи на термореактивните смоли. Се применуваат во вид на ровинг (континуирани струкови), сечкани струкови, ткаенини, мат (врз база на континуирани и сечкани влакна) и во мелена форма. Јачината и модулот на еластичност на стаклените влакна се многу повисоки од оние на полимерната матрица.

Во автомобилската индустрија стаклените влакна се користат за производство на трансмисиони ремени, профили, гуртни за кочници, ламели, изолација на автомобилите и други делови од каросеријата. Исто така, се користат за производство на спортски реквизити како што се стапови за хокеј, скии, штици за сурфање, скии за вода, како и за изработка на кајаци, чамци и други компоненти за бродови.

2.2.1.2. Јаглородни влакна (Carbon fibers)

Јаглородните влакна се базираат исклучиво на елементот јаглород и затоа се меѓу најлесните неоргански материјали. Јаглородот е многу лесен елемент со густина $2,268 \text{ g/cm}^3$. Јаглородот може да егзистира во различни кристални форми: графитна, каде што јаглородните атоми се подредени во вид на

хексагонални слоеви; ковалентна дијамантска структура, каде што јаглеродните атоми се распоредени во тридимензионална конфигурација со мала структурна флексибилност. Силните ковалентни врски помеѓу sp^2 хибридизираните јаглеродни атоми доведува до екстремно висока крутост. Постојат три типови на почетни сировини (прекурсори) кои најчесто се користат за производство на јаглеродни влакна: полиакрилонитрил (PAN) целулозни влакна (рајон -rayon fibers) и мезофазен катран (pitch) [4,5,14].

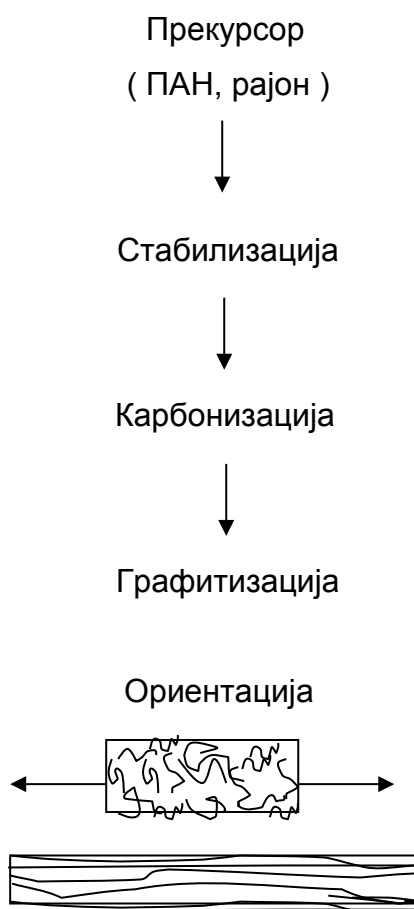
Како што е познато цврстината на врската го детерминира модулот на материјалот. Јаката врска меѓу јаглеродните атоми во рамнината на слоевите резултира во извонредно висок модул, додека слабите Ван дер Валсови врски меѓу соседните слоеви резултираат во низок модул во тој правец. Јаглеродни влакна со екстремно голем модул можат да се добијаат со карбонизација на органски прекурсор- влакна, проследено со графитизација при висока температура. Органското влакно е специјално текстилно полимерно влакно што може да се карбонизира без топење. Прекурсор влакното, како и секое друго полимерно влакно се состои од долги верижни молекули ($0,1-1\mu m$ кога се целосно растегнати) хаотично распоредени. Ваквите полимерни влакна генерално имаат лоши механички својства. Најчесто користени прекурсори се полиакрилонитрилните (ПАН) и рајон влакната. Другите прекурсори се добиваат од нафта, поливинилалкохол, полиимиди и феноли.

Процесите за добивање на јаглеродни влакна ги вклучуваат следните етапи [5,14,15]:

1. *Стабилизационен третман*, што спречува влакната да се стопат во наредните третмани на висока температура,
2. Термички третман наречен *карбонизација* со кој се отстрануваат повеќето нејаглеродни елементи,
3. Термички третман наречен *графитизација* што ги подобрува особините на јаглеродните влакна.

Шематски процесот на добивање на јаглеродни влакна е прикажан на слика 2.3 [14]. За да се добијаат високомодулни влакна потребно е да се подобри ориентацијата на влакната, што се постигнува со различни начини на термички третман и истегнување. Прекурсорите за влакна врз база на *полиакрилонитрил* (PAN) се смоли кои се состојат од кополимери со

акрилонитрил како главна мономерна компонента и некои други мономерни кои се додаваат за да ја контролираат брзината на оксидација и температурата на стаклосување. PAN влакната се предат во мокра состојба од смолата, се стабилизираат во воздух на температури помеѓу 200 °C и 400 °C и на крај се карбонизираат во инертна атмосфера во температурен интервал од 1500-3000 °C. Отстранувањето на нечистотиите во влакната прекурсори, како и контролата при процесот на стабилизација на влакната и брзината на загревање, се важни чекори за конечната структура и својствата на добиените јаглородни влакна.



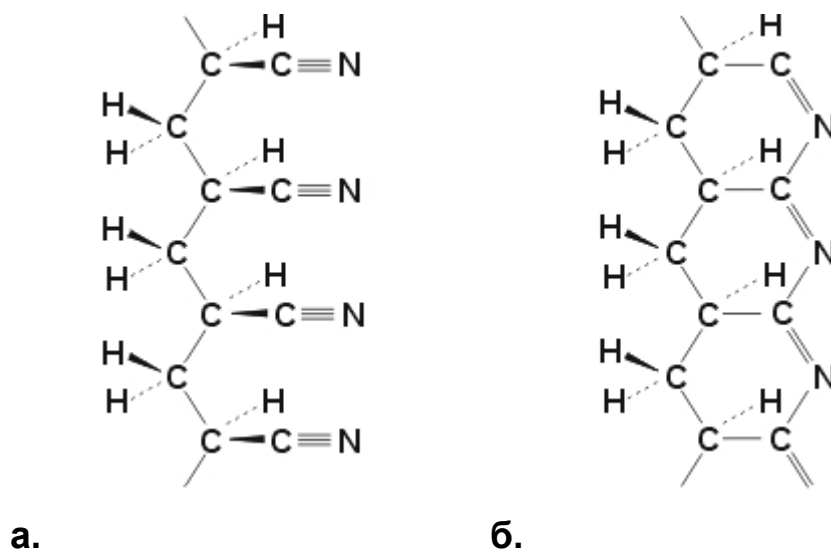
Слика 2.3. Шематски приказ на производство на јаглородни влакна

Figure 2.3. Schematic representation of the production of carbon fiber

Кога се користат ПАН влакната како појдовен материјал, тие се затегнати за да се добијат ориентирани молекуларни вериги во долж оската на влакното. Иницијалното затегање на ПАН влакната го подобрува аксијалното ориентирање на полимерните молекули. За време на оксидациониот третман

се држат под напрегање за да се задржи подреденоста на ПАН влакната. Ако нема затегање во оваа фаза ќе настане релаксација и структурата на скалестиот (ladder) полимер ќе стане дезориентирана во однос на оската на влакното. По стабилизациониот третман, резултирачката скалеста структура (или уште наречена ориентирана циклична структура) има висока температура на фазна промена, така што нема потреба за затегање на влакната во наредната фаза - карбонизација. Јаглеродните атоми по овој третман главно се во вид на мрежа од оптегнати хексагонални ленти, која во литературата е наречена turbostratic графитна структура. Степенот на подреденост на една лента во однос на друга се подобрува со термички третман на високи температури (до 3000°C) - графитизација.

На слика 2.4. а и б е дадена флексибилна полиакрилонитрилна молекула и крута скалеста или ориентирана циклична молекула [5, 14,16].



Слика 2.4. а. Флексибилна полиакрилонитрилна молекула

б. Крута скалеста (или ориентирана циклична) молекула

Figure 2.4. a. Flexible polyacrylonitrile molecule

b. Rigid ladder (or oriented cyclic) molecule

Структурата на јаглеродните влакна врз база на ПАН се состои од многу графитни ламинарни ленти ориентирани паралелно на оската на влакното со сложено внатрешно поврзување на слоестите нивоа (слика 2.5. а и б) [14,17].

Во табела 2.6. [5,14] дадени се споредбените својства на различни јаглородни влакна кои се разликуваат во зависност од почетниот материјал (rayon, ПАН и катран), од што зависат и крајните својства на влакната.

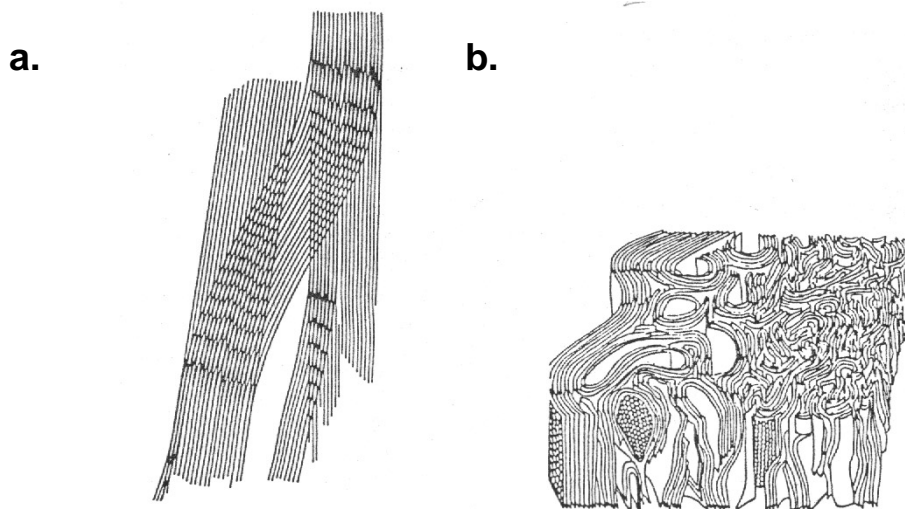
Како што се гледа, густината на јаглородните влакна зависи од прекурсорот и од термичкиот третман и варира од 1,6 - 2,2 g/cm³.

Една од класификациите на јаглородните влакна е според модулот при истегнување:

- **HT** влакно (200-300 GPa) - со висока јачина на истегнување но со среден модул,
- **HM** влакно (400 GPa) - со висок модул,
- **SHT** влакно - со супер висока јачина на истегнување,
- **SHM** влакно - јаглородни влакна со супервисок модул.

Дијаметарот на влакната е од 4 до 10 μm , а се произведуваат како континуирани и сецкани.

Јаглородните влакна заради анизотропијата имаат и два коефициенти на термичка експанзија, попречно на оската на влакното, α_t и паралелно на оската од влакното, α_l [5,14].



Слика 2.5. а. Дводимензионална репрезентација на јаглородно влакно на основа на ПАН, **б.** Тридимензионална репрезентација на јаглородно влакно на основа на ПАН

Figure 2.5. a. Two-dimensional representation of carbon fiber based on PAN, **b.** Three-dimensional representation of carbon fiber based on PAN

Вообичаено е јаглеродните влакна да се обработуваат со заштитен слој - апретура, со што се подобрува нивната адхезија со полимерната матрица (површинска оксидација). Заштитниот слој, за јаглеродните влакна што се користат во структурни композити е главно на основа на епоксиди, во различно количество во зависност од крајното користење на влакната. За ткаење заштитниот слој е околу 1-2%, додека за намотување, за пререг или прес маси, заштитниот слој е 0,5-1%. Типот и количеството на заштитниот слој влијае и врз степенот на ширење на влакното. Често јаглеродните влакна се испорачуваат и со 3-4 различни количества на заштитен слој, како различни степени на квалитет [4].

Табела 2.6. Споредбени карактеристики на различни јаглеродни влакна

Table 2.6. Comparative characteristics of the various carbon fiber

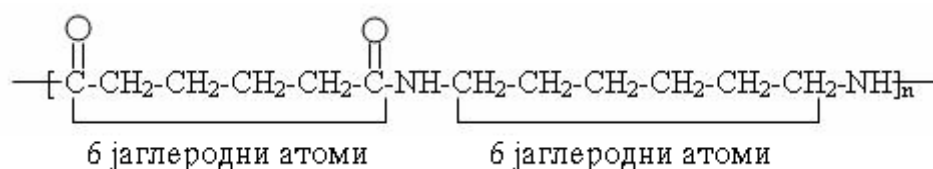
Прекурсор	Густина, g/cm ³	Young-ов модул, GPa
Рајон	1,66	390
Полиакрилонитрил (ПАН)	1,74	230
Смола (Kureha)		
LT третирана на ниска температура	1,6	41
HT третирана на висока температура	1,6	41,61
Мезофазна смола		
LT третирана на ниска температура	2,1	340
HT третирана на висока температура	2,2	690

Според јачина и жилавоста, јаглеродните влакна се единствени кои покажуваат предност во однос на ниската густина (пониска од 2 g/cm³), со што нивна примена е широка. Полимерните композитни материјали зајакнати со јаглеродни влакна доведоа до револуција во областа на конструктивните композитни материјали и тие многу се применуваат во ракетната, авионската, воената, автомобилската индустрија, машинството, градежната индустрија

итн. Јаглеродните влакна исто така се користат и за изработка на спортски реквизити (скии, велосипедски рамови, стапови за риболов), музички инструменти, зајакнувачи во вид на саќе, зајакнувачки фолии, за изработка на различни делови кои се отпорни на замор и слично. Нов подем во развојот е производството на супер јаки (500 до 700 GPa) јаглеродни влакна со низок степен на издолжување (1,5 до 2%) и висока енергија на кинење.

2.2.1.3. Полиамидни (најлон) влакна (Polyamide (nylon) fibers)

Најлоните спаѓаат во најчестите полимери што се користат во форма на влакна. Поимот најлон се однесува на фамилијата на полимери наречени линеарни полиамиди. Тие се првите современи инженерски термопласти. Откриени се во триесеттите години од минатиот век во лабораториите на Du Pont во САД [5,6]. Се добиваат со кондензациона реакција меѓу адипинска киселина, $(\text{CH}_2)_4(\text{COOH})_2$ и хексаметилендиамин, $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$. Добиениот најлон е наречен најлон 6,6 спрема бројот на јаглеродните атоми во повторувачките единици на двете страни на иминската група, слика 2.6.

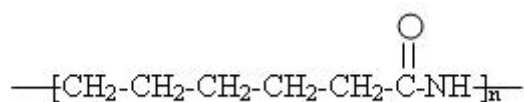


Слика 2.6. Структурна формула на најлон 6,6

Figure 2.6. Structure of nylon 6,6

Влакната се произведуваат со истиснување на растопената маса низ многу фини отвори и претставува прво вештачко влакно кое е добиено со топење.

Друг тип на најлон е најлонот 6. Тој е сличен на најлонот 6,6 со таа разлика што има само еден вид на јаглероден синџир со шест јаглеородни атоми, слика 2.7.



Слика 2.7. Структурна формула на најлон 6

Figure 2.7. Structure of nylon 6

Постојат и други типови на најлон, но овие два типа, заради пониската цена на чинење и поволните особини, се најмногу експлоатирани како технички влакна [4-6]. Во табелата 2.7 дадени се споредбено основните податоци за овие влакна.

Табела 2.7. Особини на најлонските влакна

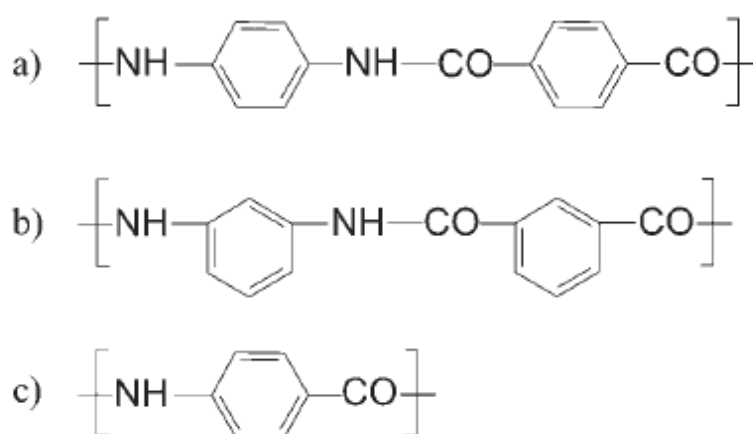
Table 2.7. Features of polyamide (nylon) fibers

	<i>Најлон 6,6</i>	<i>Најлон 6</i>
Апликација	влакна; инж. пластика	влакна; инж. пластика
Мономери	адипинска киселина и хекасаметилендиамин	капролактам
Полимеризација	кондензациона полимеризација во кисела средина	полимеризација со отворанје на прстенот (ринг-опенинг)
Морфологија	висококристален	висококристален
Tm	280°C	215 °C
Tg	50 °C	40 °C

Најлонските влакна се одликуваат со извонредна јачина, еластичност, отпорност на абење, ниска апсорбција на влага, отпорност на дејството на масла и многу други хемикалии итн. Главно се применуваат за изработка на облека, теписи и прекривачи, автомобилски гуми, падобрани, церади, ракетни делови итн.

2.2.1.4. Арамидни влакна (Aramid fibers)

Арамидно влакно е генеричко име за специјален тип на “ароматско полиамидно влакно” кое е дефинирано како “вештачко влакно кај кое формирачката супстанца на влакното е синтетски полиамид со долга верига кај која, најмалку 85% од амидните врски (-CO-NH-) се директно сврзани со два ароматски прстени“. Тоа значи дека кај арамидот повеќето од амидните групи се директно сврзани со два ароматски прстени. Не е ни чудно што арамидите (ароматските полиамиди) имаат сосема различни особини од алифатските полиамиди бидејќи овие полимери не содржат ароматски групи во нивната главната верига. Името им доаѓа од: **ароматски полиамид** [4-6]. Хемиската структура на некои ароматски полиамиди се претставени на слика 2.8.

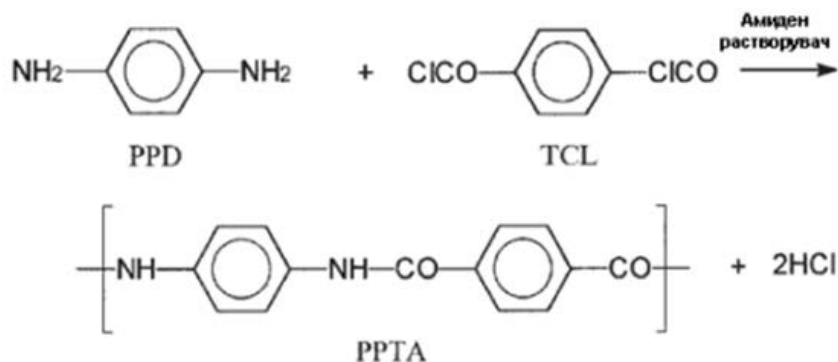


Слика 2.8. Хемиска структура: а) Поли (p- фенилен терефталамид) (PPD-T), б) Поли (m- фенилен изофталамид) (MPD-I) - , в) Поли (p-бензенамид) (PPBA)

Figure 2.8. - Chemical bonds: a) poly(p-phenylene terephthal- amide) (PPD-T), b) poly(m-phenylene isophthalamide) (MPD-I), в) poly(p-benzamide) (PPBA)

Хемискиот назив на Nomex е поли-m-фенилен изофталамид (MPIA), додека на Kevlar и Twaron, поли-p-фенилен терефталамид (PPTA).

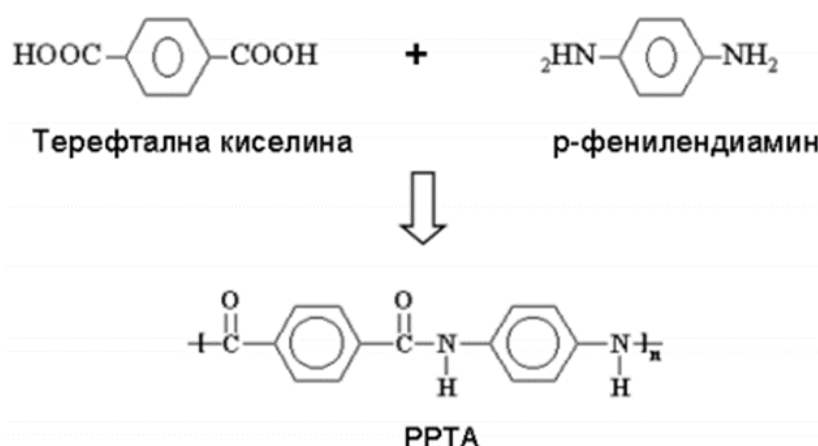
Ароматските полиамиди од типот PPTA обично се синтетизираат преку ниско - температурна поликондензациона реакција на p-фенилен диамин (PPD) и терефталоил хлорид (TCL) според следнава хемиска реакција:



Слика 2.9. Синтеза на PPTA од PPD и TCL

Figure 2.9. PPTA synthesis from PPD and TCL

Алтернативен начин е синтеза со реакција на ароматски дикарбоксилни киселини и диамини. Оваа синтеза е поевтина бидејќи дикарбоксилните киселини се поевтин стартен материјал. Како растворувач се користи концентрирана сулфурна киселина. Nomex се произведува со кондензациона реакција од мономерите *m*-фенилендиамин и изофталоил хлорид.



Слика 2.10. Синтеза на PPTA од PPD и терефтална киселина

Figure 2.10. PPTA synthesis from PPD and terephthalic acid

Физички и термички особини

Арамидните влакна имаат природно жолтеникава (златна) боја заради присуството на ароматските прстени, густина од 1,43-1,46 g/cm³ и типичен дијаметар од 12 μm. Ароматските прстени во 'рбетната верига придонесуваат за висока термичка стабилност. Температурата на стаклосување на пара-

арамидните влакна е над 370 °C, додека на мета-арамидните, 255-260 °C. Немаат точка на топење бидејќи се разградуваат пред да се стопат. Со термогравиметриска анализа во воздух е покажано дека пара-арамидните (Kevlar) влакна почнуваат да губат тежина при 350 °C додека комплетно разградување настанува меѓу 427 °C и 482 °C. Покрај тоа, арамидите покажуваат краткотрајно отпорност спрема дејство на пламен, но сепак можат да се запалат при подолго дејство на пламенот. Kevlar влакната не го поддржуваат горењето туку се јагленосуваат на околу 427 °C, додека Technora на 650 °C. Ароматските полиамиди се карактеризираат со одлична димензиона стабилност која се манифестира со многу мало собирање при загревање на високи температури и со многу мал коефициент на термичка експанзија.

Апсорпцијата на вода е еден од најчесто споменуваните недостатоци на арамидните влакна. Во зависност од условите на животната средина, со апсорпција на вода арамидни влакна може да ја зголемат својата тежина дури до 7%. Овој процент зависи од видот на арамидните влакна, процентот на нечистотии во материјалот (првенствено пепел) и условите на животната средина [5, 6].

Механички особини

Арамидните влакна поседуваат извонредни механички особини. Иницијалниот модул на затегање, на различните арамидни влакна, е над 39 GPa, а јачината на затегање над 1,3 GPa. Овие вредности значително се менуваат во зависност од типот на полимерот, микроструктурата, условите на извлекување и термичкиот третман. Во табела 6 се презентирани неколку својствата на дел од комерцијално достапните арамидни влакна. Како што може да се види од табелата, пара-арамидните влакна (Kevlar и Twaron) имаат иницијални модули на затегање меѓу 70 и 142 GPa и јачина на затегање меѓу 2,3 и 3,2 GPa.

Табела 2.8. Типови на комерцијални арамидни влакна**Table 2.8.** Commercial aramid fibers

Трговска ознака/ Trade mark	Фирма/ Company	Густина/ Density g/cm ³	Модул/ Module GPa	Јакост/ Strength GPa	Издржливост при прекин/ Elongation at break %
Kelvar 29	DuPont	1.44	72	2.9	3.6
Kelvar 29	DuPont	1.44	112	3.0	2.4
Kelvar 29	DuPont	1.45	143	2.3	1.5
Nomex	DuPont	1.38	11.6	0.59	28.0
Twaron	Teijin Aramid	1.44	70	3.2	3.3
Twaron HM	Teijin Aramid	1.45	103	2.8	.25
Technora	Teijin Aramid	1.39	73	3.4	4.6

Добрите особини, главно, се должат на структурата што се формира во текот на извлекувањето. За разлика од пара-арамидните влакна, мета-арамидните (на пример Nomex и Conex) имаат искривени вериги кои можат да се свиткуваат и ротираат дури и при мали напрегања и се помалку крути и јаки од пара-арамидните. Нивниот иницијален модул е типично од ред на 10 GPa а јачина на затегање од ред на 600 MPa. Од друга страна тие се полесни за производство и поевтини. Technora влакната кои се врз база на PPTA кополимер имаат различна хемиска структура (во 'рбетната верига имаат - O - врска) од онаа на Kevlar и Twaron и имаат вредност на модулот на затегање меѓу оној на мета и пара арамидните влакна. Понатамошно зголемување на модулот на затегање е можно со внесување на циклични прстени кои ја зголемуваат крутоста на полимерните вериги.

Арамидните влакна поради добрите механички и хемиски својства имаат огромен потенцијал на пазарот и широка примена во сите гранки на човековата активност. Причината за слабата примена на арамидните влакна во минатото е нивната висока цена што делумно се должи на исклучително комплексните процеси за нивно производство. Арамидните влакна се користат во авионската, воената, автомобилската индустрија, индустријата за спортски реквизити и сл..

Исто така се користат и за изработка на кајаци, тркачки чамци и мали бродови каде максималната јачина и минималната тежина се важни. Широка примена имаат и во телекомуникациите како носачи на оптичките кабли [6-8].

2.2.2. Полимерна матрица (Polymer matrix)

Полимерната матрица е присутна обично со 30-40 % во композитот и покрај основната функција - да ја обедини дисперзираната фаза и да го сочува обликот на композитот, таа исполнува различни други функции. Матрицата ја заштитува дисперзираната фаза од абразија и корозија под дејство на надворешни влијанија. Термичкото однесување на композитот главно зависи од термичката стабилност на матрицата. Најважното, матрицата го распределува применетото оптоварување и игра улога на пренесувач на напрегањето, па така кога индивидуалните зајакнувачи попуштаат, композитната структура не ја губи својата способност и натаму да издржува оптоварување. Меѓуслојната жилавост, јакоста на смолкнување, компресија и трансверзалната (попечна) јакост на композитот се, исто така, диктирани од матрицата. За да бидат исполнети сите овие функции, адхезијата меѓу зајакнувачката фаза и матрицата треба да биде што поголема. Кршењето (фрактурите) кај композитниот материјал е резултат на комбинираното однесување на зајакнувачот, матрицата и интерфејсот меѓу нив.

Некој својства на матрицата кои најмногу влијаат на однесувањето на композитот се :

- Модул на еластичност (тврдина),
- Јачина на истегнување, компресиона , на смолкнување,
- Гранично издолжување,
- Отпорност на агресивни органски течности,
- Отпорност на кршење (жилавост) и толеранцијата на оштетување,
- Термичка и оксидациона стабилност и влаговпивање

Полимерните матрици за композитите се делат на термореактивни (thermosetting) и термопластични (thermoplastics).

Термопластичните полимерни матрици при загревање омекнуваат или се топат, а при ладње повторно се втврдуваат. Овој процес може да биде често

повторуван, при што во полимерот не се случуваат никакви хемиски промени. . Типични термoplastи се полиамид - PA, полипропилен - PP и ABS.

Термореактивните полимери содржат молекули кои се вмрежени и при загревање не омекнуваат. Термореактивните полимерни матрици се формираат при реакција, во која смолата и вцврснувачот или смолата и катализаторот се мешаат и потоа трпат иреверзибилна хемиска реакција. По вмрежувањето, кое најчесто се изведува на повишени температури, тие стануваат крути, нетопливи и нерастворливи продукти. Кај некои термореактивни полимери, како што се фенолните смоли, се создаваат испарливи супстанции како нус производ (кондензациона реакција). Други термореактивни смоли (како што се полиестрите и епоксидите) се вмрежуваат без издвојување испарливи супстанции како нус продукт и тие се многу полесни за процесирање (адисии реакции). Еднаш вмрежените термореактивни полимери не можат да преминат повторно во течност при загревање, поради што над одредена температура нивните механички својства значително се менуваат. Оваа температура е позната како температура на стаклосување (Glass Transition Temperature T_g); T_g варира широко за различни полимерни системи. Над T_g , молекулската структура на термореактивната смола се менува: од крут полимер минува во пофлексибилен, аморфен полимер. Над T_g модулот на смолата нагло опаѓа и како резултат на тоа јачината на притисок и смолкнување на композитите исто така опаѓа. Другите својства, како што се отпорност на вода и стабилност на боја, се редуцирани над T_g на смолата [7,8,18].

Тешко е да се категоризираат полимерните термореактивни смоли, но генерално има многу типови и јачини на *епоксидни смоли* (често вмрежени на висока температура), *полиестерски смоли* (ниска цена, вмрежени на собна температура) и *винил естерски смолни системи* (ниска цена, низок вискозитет, добра отпорност на вода и лесно процесирање). Има многу специјализирани смоли, како што се бисмалеимидните, кои се одликуваат со термичка постојаност.

Полимерните матрици кои се користат за композитни материјали треба да ги поседуваат следните својства:

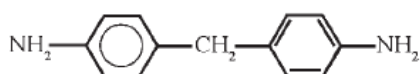
- добри механички својства,
- добри адхезиони својства,

- добри својства на жилавост,
- добра постојаност на атмосферски влијанија.

Кога се оценува погодноста на даден полимер за композит со специфична намена, битни параметрите при употреба на истиот се: температура, време, напрегања, влага, хемиски ефекти и сл. Покрај тоа, предисторијата и условите на процесирање на полимерот можат да влијаат на својствата на композитот. На пример, порите, меѓуфазното поврзување, заостанатите напрегања и морфологијата можат во широки граници да ги менуваат својствата на еден ист композит [8,19,20].

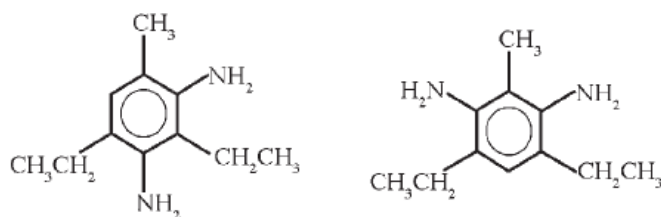
2.2.2.1. Епоксидни смоли (Epoxy resin)

Епоксидните смоли се класа на разновидни полимерни термореактивни материјали кои се карактеризираат со присуството на два или повеќе циклични прстени во нивната молекуларна структура. Како и останатите термореактивни смоли и тие исто така се вмрежуваат со примена на различни вмрежувачки агенси како што се: амини, анхидриди, тиоли и др. Амините се најчесто користени вмрежувачки агенси поради подобрата контрола на епокси-амино реакциите. Хемиските структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси се претставени на слика 2.11: триетилен тетрамин (TETA), 4,4' диамино дифенил метан (DDM), 4,4' диамино дифенил сулфон (DDS), диетил толуен диамин (DETDA) [19,20].



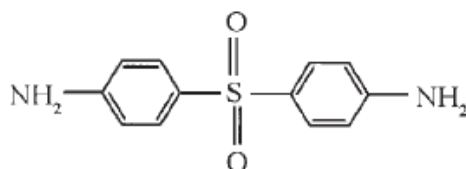
диамино дифенил метан (DDM)

diamino diphenyl methane (DDM)



Диетил толуен диамин (DETDA)

diethyl toluene diamine (DETDA)



диетил толуен диамин (DDS)

diethyl toluene diamine (DDS)



триетилен тетрамин (TETA)

triethylene tetramine (TETA)

Слика 2.11. Хемиски структури на некои од најчесто применуваните
вмрежувачки агенси

Figure 2.11. Chemical structures of commonly used curing agents

Големата примена на епоксидните смоли се должи на можноста епоксидните групи да стапуваат во различни хемиски реакции и пред се на нивните корисни својства, како што се високата јачина, ниската вискозност, одличната корозивна отпорност, постојаноста на високи температури и соодветните електрични својства. Епоксидните смоли претставуваат многу често применувана полимерна матрица за добивање на композитни материјали, а посебно наоѓаат примена во воздухопловната индустрија, поради нивната лесна обработка, добрите механички својства како и поволната цена. Тие се термореактивни и инертни системи на смола од кои може да се добие добра комбинација на високи механички и електрични својства. Тие можат да се користат и на температура од 180–270 °C. Нивната јачина на истегнување може да биде до 83 МПа, цврстина по Rockwell M110 и издолжување од 2-5%. Епоксидните смоли исто така имаат и висока отпорност кон растворувачи, масла и хемикалии

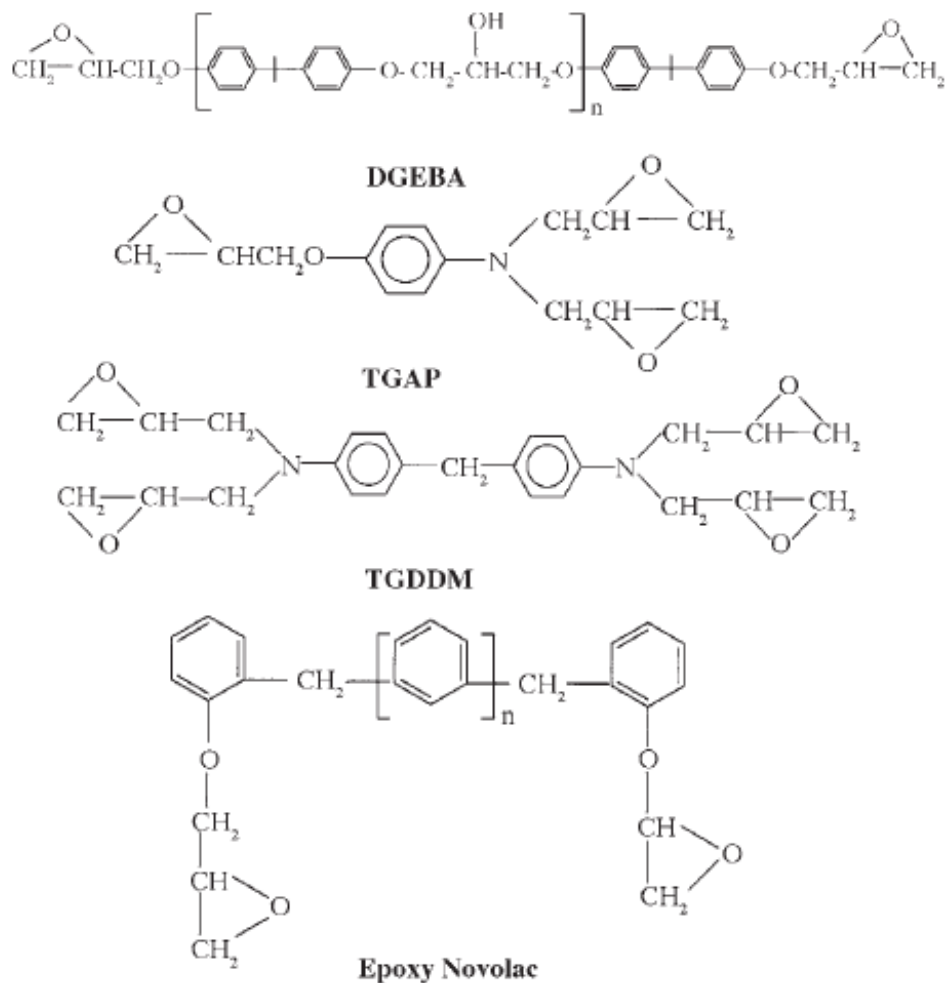
Епоксидните смоли се издвојуваат помеѓу останатите термореактивните смоли поради неколку фактори (18,20,21) имено:

- Потребен е минимален притисок за изработка на производите за кој вообичаено се користат термореактивни смоли.

- Собирањето е многу мало и поради тоа помали се и заостанатите напрегања во вмрежениот производ во споредба со полимеризацијата на винил кој се користи за вмрежување на незаситени полиестерски смоли.
- Употреба на широк спектар на температури со внимателна селекција на вмрежувачки агенси и добра контрола над степенот на вкрстено поврзување.
- Достапноста на смолите од ниско вискозна течност до цврста нелеплива состојба итн.
- Епоксидните смоли имаат широка примена за добивање на структурни лепила, површинските облоги, инженерски композитни материјали и електроизолациони ламинати.

Најчесто употребуваната епоксидна смола е таа која се карактеризира со присуство на две епоксидни групи (DGEBA). Мултифункционални епоксидни смоли со три или четири функционални групи се исто така достапни. Хемиските структури на дифункционалната и мултифункционалните епоксидни смоли како што се епокси новолак (Dow DEN 438), тетраглицидил етер од 4,4'-диамино дифенил метан (TGDDM), триглицидил p-амино фенол (TGAP), се прикажани на Слика 2.12.

Хемиската природа и количината на употребени вмрежувачки агенси играат важна улога во определувањето на термомеханичките својства на вмрежените полимери. Широк спектар на својства како и материјали за екстремни апликации можат да се добијат со употреба на истите смоли, преку внимателна селекција на вмрежувачки агенси. На пример, кога за вмрежување на DGEBA, се користи ароматичен амин, се добива смолен систем со висока температура на стаклосување (T_g) која може да се користи за високо температурни композитни апликации додека, ако се користи Jeffamine ($M_n > 800 \text{ g/mole}$) како вмрежувачки агенс се создава флексибилна мрежа, која може да се користи за апликациите со вибрациона амортизација (5,6,18).



Слика 2.12. Хемиски структури на функционални и мултифункционален епоксиди

Figure 2.12. Chemical structures of functional and multifunctional epoxies

Епоксидни матрици со високи вредности за T_g може да се добијат со употреба на ароматски вмрежувачки агенси како DDM, DDS, DETDA. Предноста на DETDA над другите е што е во течна состојба и нуди подобра процесибилност. T_g може понатаму да се зголемува со употреба на смола со висока функционалност. Термички стабилни смоли со високи перформанси се неопходни за композитни структури кои се користат во авионската индустрија. Полиимидните и цијано естерските смоли наоѓаат широка примена за изработка на надворешни структурни компоненти. Конвенционалните епоксидни смоли генерално не се соодветни за апликации во авионската индустрија. Сепак, мултифункционалните епоксидни смоли вмрежени со

примена на соодветни ароматични амини, може да понудат подобра термичка стабилност во споредба со полиимидите.

Голем број на композити може да се добијат со користење на епоксидните смоли како матрица (Табела 2.9). Тие може широко да се групираат во следниве три групи: композити зајакнати со влакна (FRP), композитите зајакнати со честици и нанокмползити [4,6,8,18,20].

FRP епоксидните композити може да се добијат со внимателна селекција на составот на смолата, влакната и дизајнирање на интерфејсот меѓу нив. FRP композитите наоѓаат примена во авионската, автомобилската индустрија и други (18-22). FRP епоксидните композитите (за генерална употреба) се направени со техника на влажно положување и последователно пресување во капа. Слични ламинирани композити, произведени со пресување со пренос на смолата (RTM), нудат помали трошоци, здравствени и безбедносни придобивки.

Полимерните композити врз база на епоксидни смоли се познати по високата осетливост на внатрешни оштетувања поради кршливоста на вмрежената смола, што може да доведе до нарушување на безбедноста и проблеми со постојаноста [18,19]. Поради тоа, за апликации со високи перформанси подобрувањето на толеранцијата на оштетување на епоксидните композитите е неопходна и претставува предмет на истражување [20,21].

Табела 2.9. Различни видови на епоксидни композити и процес на производство

Table 2.9. Various types of epoxy composites and the manufacturing processes

Композити/ Composites	Зајакнувач/ Reinforcement	Процес/ Process
Полимерни композити зајакнати со влакна	Стаклени влакна, јаглородни влакна, кевлар влакна, базалт влакна	Влажно положување и пресување во калап, положување на препрегот со вакум и вмрежување во автоклав, намотување на филаменти со вмрежување во печка (FW), пултрузија, пресување со пренос на смолата (RTM), структурно реакционно инјекционо пресување

Микро-композити зајакнати со честици	Силициум, сецкани јаглеродни влакна, калциум карбонат, сецкани стаклени влакна, силициум карбид	Механичко мешање и леење, пресување во калап
Наноккомпозити	Нано силициум, нано калциум, јаглероди нановлакна, јаглеродни наноцевки	Механичко мешање со ултразвук, леење или пресување во калап

2.3. Технологија на намотување на влакна (Filament winding technology)

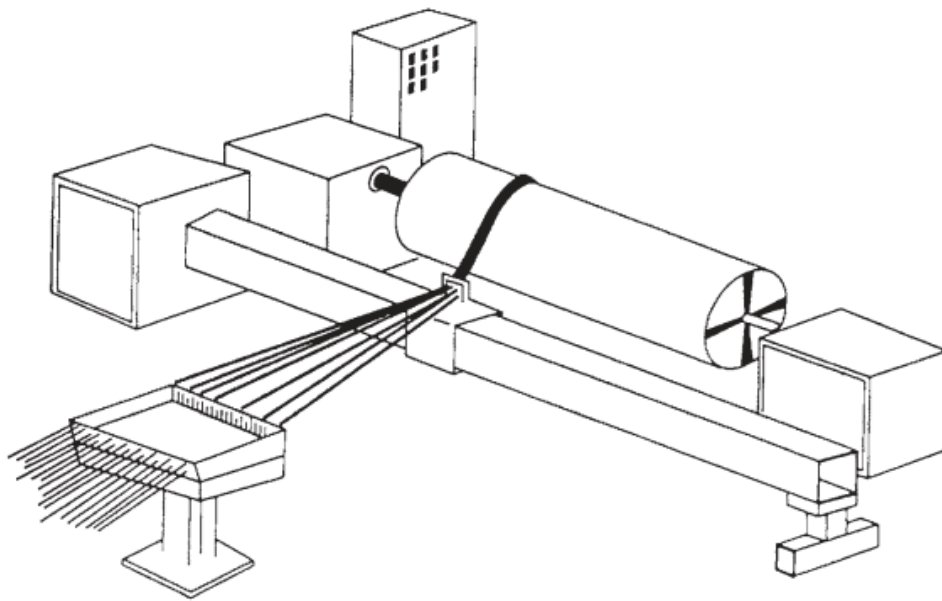
Технологија на намотување на влакна е процес кој се користи за производство на композитни структури, како цевки за транспорт на флуиди и гасови, резервоари за течен нафтен гас, компримиран природен гас, електрични изолатори, столбови за светилки, ветерници и други производи. За производство на композитни материјали со оваа технологија се користи зајакнувачки материјал во форма на континуирани влакна (стаклени, јаглеродни, арамидни, итн.) кои се натопуваат во полимерна термореактивна матрица во форма на течна смола (полиестерска, епоксидна и сл.). Зајкнувачот е во форма на ровинг или монофиламент кој се импрегнира во када за импрегнација и се намотува на ротирачки мандрел [15].

За изведување на оваа технологија се користат специјално дизајнирани машини, чија брзина е синхронизирана со брзината на ротација на мандрелот, а исто така нудат и можност за варијација на брзината и тензијата на зајакнувачот како и аглите под кои се намотува зајакнувачот т.е. влакната. Може да се прави и намотување на ленти. Влакната или лентите се наоѓаат под тензија и со помош на намотувачка глава, која може да создава притисок врз мандрелот, се добиваат посакуваните структури. Во зависност од потребата и капацитетот на поодделните производители достапни се машини во различни големини и конфигурации. Машините се компјутерски контролирани и автоматизирани за прецизно положување на точен број на

слоеви од зајакнувачот т.е. влакната. Со намотување на влакната се добива можност за производство на краен производ во различна форма (цилиндрична, сферична, конусна и др. форми). Вообичаено овој процес пред се се користи за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и горива, како и за производство на цевки со различен дијаметар (од неколку сантиметри до еден или два метри). Процесот на намотување на влакната (зајакнувач) дава можност дизајнерот да ги креира механичките карактеристики и да ги оптимизира јачината, цврстината и термичката стабилност на добиените композитни структури.

На слика 2.13 е даден шематски приказ на процесот на намотување на влакна. Основниот принцип се состои од повлекување на филаментните нишки од шпулите поставени на гатерот. Филаментните нишки се водат низ системот за раздвојување (кој се состои од чешли) со цел да се овозможи нивно поединечно движење. Раздвоените филаментни нишки поминуваат низ када со смола (во случај на влажно намотување), во која се наоѓа систем од валјаци кои ја регулираат количината на нанесена смола. На излез од кадата со смола, филаментните нишки се собираат во водилка (прстен) со помош на која се формира ширината на слојот кој се намотува на површината на мандрелот (ротирачко јадро) . Филаментите се движат и напред и назад по должината на ротирачкиот мандрел, кој е придвижуван од мотор. Филаментните слоеви се водат со одредена затегнатост (тензија) која е значајна за одржување на нивниот правец на положување врз површината на мандрелот. Самиот процес продолжува со намотување на дополнителните слоеви врз површината на мандрелот, се додека не се постигнат барањата кој се поставени за тој дизајн (дебелина на сидот на композитниот дел). Со покривање на површината на мандрелот во многу слоеви, се гради дебелина на сидот на делот. Ориентацијата на влакната може да се контролира со различни брзини на надолжното движење на влакната и ротационата брзина на мандрелот. Тензијата на влакната е значајна за да се држат во одреден правец кога се намотуваат на површината на мандрелот. Секој слој може да се разликува во тензија на намотување, агол на намотување, или содржина на смола т.е. масен удел на смола. Со варирање на аголот на намотување во однос на оската на мандрелот, може да се произведе готов производ што ќе ја издржи силата на

оптоварување. На крај се врши втврдување (вмрежување) на добиениот композитниот дел во печка на одредена температура и негово отстранување од мандрелот. Оваа технологија вообичаено се користи за производство на цилиндрични или сферни композитни структури. Површините на овие структури се обично конвексни, бидејќи доколку површината е конкавна, при аплицирање (положување) на влакната на таква површина може да се појави дефект (лом) [13-17].



Слика 2.13. Шематски приказ на процесот на намотување на филаменти

Figure 2.13. Schematic representation of the filaments winding technique

Во технологијата на намотување на филаменти во зависност од барањата кои се поставени за одреден дизајн (дебелина и цврстина) можни се различни варијации во однос на затегнатоста (тензијата) на намотување, аголот на намотување или содржина на смола т.е. масениот удел на смолата на филаментните слоеви. Постојат три основни начини за намотување на филаментните слоеви (слика 2.14) и тоа:

- Спирално намотување на слоеви: при спиралното намотување мандрелот ротира со константна брзина додека филаментните слоеви се движат трансверзално напред назад со одредена брзина со цел да се генерира

посакуваниот спирален агол ($\pm \theta$).

- Радијално намотување на слоеви: мандрелот е неподвижен додека аголот на намотување е речиси 90° , и може да се користи во комбинација со спирално намотување.

- Поларно намотување на слоеви: филаментите поминуваат тангенцијално на поларниот отвор на едниот крај од комората и потоа се движат тангенцијално во спротивна насока на поларниот отвор на другиот крај од комората.

Најчесто се користи спиралното намотување бидејќи е возможно варирање на аголот на намотување.

Други предности на оваа технологија се: високата специфична јачина, високиот специфичен модул и големиот волуменски удел на влакната во готовиот производ, како и високата повторливост на процесот. Производството може да се повторува сукцесивно, со цел да се добијат готовите производи со исти својства.

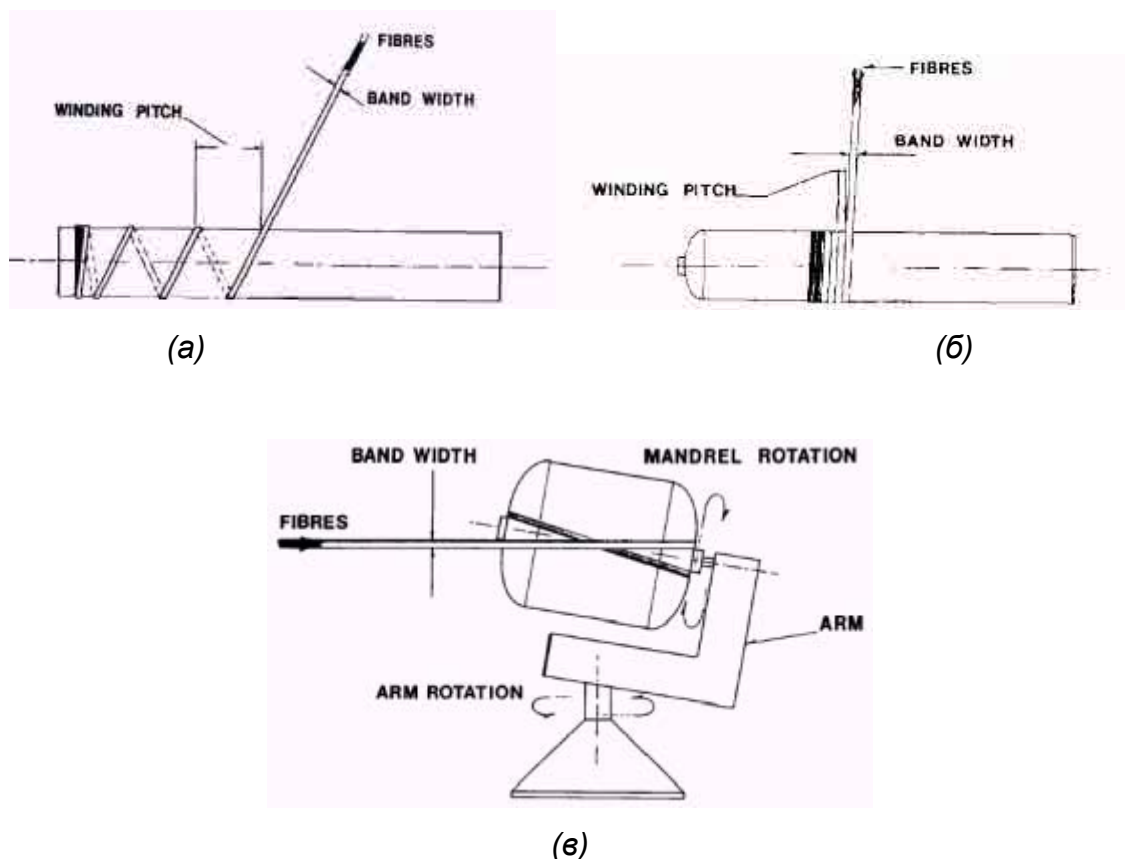
Главното ограничување на технологијата на намотување на влакна претставува производството на комплексни , заради барањето на сложен дизајн на мандрелот [15].

Целиот процес на производство на композитни структури со намотување на влакна се состои од следниве системи:

1. Единица за припрема на смолниот систем
2. Станица каде се одмотуваат влакната и се контролира тензијата
3. Када за импрегнација
4. Око и систем за транспорт на конците
5. Мандрел
6. Печка
7. Мандрел екстрактор (извлекувачка)
8. Испитување

Бидејќи филаментите се спакувани во ролни при техниката на намотување неопходно е нивната затегнатост постојано да се контролира пред процесот на импрегнација. Ова може да се постигне со примена на соодветен уред за затегнување. Применетата затегнатост може исто така да влијае врз механичките својства на добиениот готов производ. Композитни системи кои се

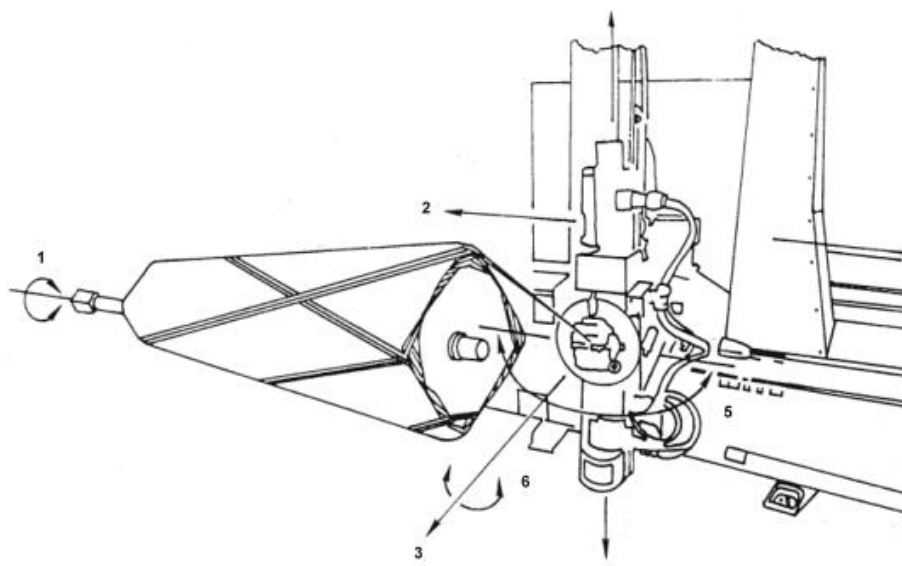
состојат од влакна и смола имаат висока примена во индустриски области како нови структурни материјали. Технологијата на намотување на влакна и примена на електронски систем за контрола на тензија овозможува прецизна контрола на затегнување на влакната при намотување, што е потребно за висок квалитет на производот.



Слика 2.14. а) Спирално намотување на слоеви; б) Радијално намотување на слоеви; в) Поларно намотување на слоеви;

Figure 2.14. а) Presentation of coupled helical winding of layers; б) Presentation of hoop winding of layers; в) Presentation of polar winding of layers;

За проценка на композитни структури добиени со намотување се користат тестови со композитни прстени во Институти за материјали, наука и применета механика [10-12]. Прстенеста форма на примероци може да се примени за тестирање со аксијален притисок, внатрешен притисок и нивни комбинации. Јачината на истегнување на композитните прстен примероци може да се утврди со тестирање со дводелен диск [18,21].



Слика 2.15. Шематски приказ на намотување на трапезен дел на компјутерски контролирана шест осна машина

Figure 2.15. Schematic illustration of the manufacture of tapered box beam on a computer-controlled six-axis filament winder

2.3.1. Методи за намотување и импрегнација во технологијата за намотување на филаменти (Methods for filament winding and impregnation technology)

Системот на соединувањето на зајакнувачот со смола се нарекува систем за импрегнација. Во технологијата на намотување на филаменти, главно се користат две постапки на импрегнација: суво и влажно намотување.

При сувото намотување предимпрегнираните влакна директно се намотуваат и се импрегнираат на површината на мандрелот. Оваа техника е уште попозната како импрегнирано намотување. Со примената на оваа метода се овозможува производителот да добие подобри механички својства кај готовите производи. Сепак, поради високите материјални трошоци за импрегнација, оваа техника обично се користи за апликации со високи перформанси.

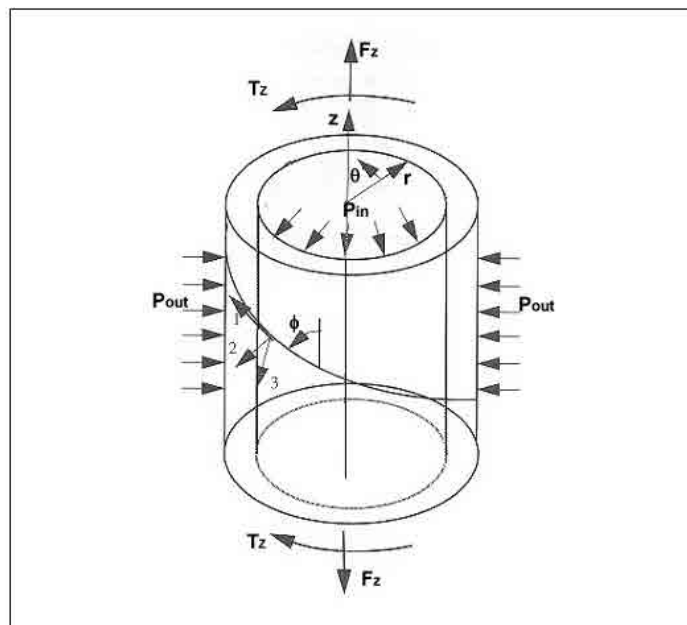
При влажното намотување, влакната се потопуваат во када со смола и импрегнацијата на влакната се врши пред нивното намотување на мандрелот. Овој метод на импрегнација е еден од најчесто применуваните методи но вклучува дополнителни процеси во однос на сувото намотување, како што се вискозноста на смолата и затегнатоста на влакната.

Вискозноста на смолата има големо значење во технологијата на намотување на филаменти. Доколку вискозноста е премногу висока имаме нерамномерно обложување на влакната со смола, но доколку вискозноста на смолниот систем е премногу ниска, тогаш смолата може да истече надвор од готовиот дел за време на процесот на намотување, што може да предизвика релативно понизок тежински процент на смолата во готовиот производ и неправилно импрегнирање.

Тензијата исто така е значаен фактор за импрегнација во оваа технологија. Затоа треба да се контролира и да се знае при кои тензии имаме добра импрегнација. Оваа влијание на тензијата длабоко го проучува Kirsí [22]. Кога тензијата на влакната се покачува од 10 до 26 N силата на кинење се зголемува од 1500 на 1800 Мра, а содржината на влакна по примерок се зголемува од 56 vol% на 63vol% [22]. Влијанието на повеќе параметри врз импрегнацијата кај оваа влажна метода, особено вискозноста на смолата, тензијата на влакната, печењето, и слично е многу повеќе анализирано и докажувано во повеќе литератури [10,21,22].

2.3.2. Анализа на композитни цевки произведени со технологија на намотување на филаменти (Analysis of the composite pipe produced by filament winding technology)

Областите на примена, вклучуваат различни услови на оптоварување, во главно, аксијални оптоварувања, торзија, внатрешен и надворешен притисок, свиткување. За одредена апликација, дебелината (бројот на намотки) и аголот на намотување на влакната се дефинирани во зависност од условите на оптоварување при кои готовиот производ ќе функционира. На слика 10 шематски се прикажани оптоварувањата на цевчеста композитна структура добиена со примена на технологијата на намотување на филаменти.



Слика 2.16. Шематски приказ на можните оптоварувањата на цевчеста композитна структура добиена со примена на технологијата на намотување на филаменти

Figure 2.16. Schematic representation of the possible loads of tubular composite structure obtained by applying of filament winding technology

Во повеќе истражувања се вршени испитувања со цел да се утврдат механичките својства на композитни цевки произведени со технологија на намотување [10-18]. Овие структури се моделираат како комбинација на слоеви, од кои секој има определен агол на намотување во однос на лонгитудиналната оска на цевката. Збир од повеќе вакви слоеви формираат композитен дел со одредена дебелина.

Композитните цевки кои се тестираат пред се треба да ги задоволат следниве две најважни барања:

1. Да се обезбедат неопходните материјали и потребната јачината за одреден дизајн;
2. Да се утврди точноста на сите студии направени со нив.

Поради овие причини мора да се избере соодветна конфигурација на примерокот кој ќе се тестира и резултатите од тестот треба да обезбедат материјални својства кои што подоцна позитивно ќе се искористат во дизајн фазата. Три типа на геометрија на примероци се најчесто употребувани при

тестирање на овие композитни структури и тоа: рамен примерок, прстенест примерок и цевковиден примерок. Својствата на аксијална тензија/компресија, кинење и однесување при свиткување на секој од тестираните примероци може да се утврдат со примена на соодветно оптоварување. За цевковидните примероци може да се користат тестовите за внатрешен притисок и торзија. Исто така ,можат да се користат и тестовите кои вклучуваат биаксијални/комбинирани оптоварувања.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ

3.1. Материјали користени за експериментите (Materials used for experiments)

Во текот на експерименталните тестови како зајакнувач за изработка на композитни цевки беа користени стаклени влакна, а како матрица беше користена термореактивна епоксидна смола.

Три компонентен епоксиден систем од Huntsman беше користен во ова истражување: Araldite® LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Зацврстувачот е анхидриден, додека катализаторот е амински [23]. Смолниот систем Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 910 претставува смеса од епоксидна смола, анхидриден зацврстувач и амински катализатор. Овој смолен систем е наменет за производство на композитни делови со високи перформанси. Процеси во кои се препорачува да се користи се: технологија на намотување (Filament Winding), Пултрузија (Pultrusion) и технологија со притисок во калап (Pressure Molding). Во табела 3.1 се дадени карактеристиките на компонентите на смолниот систем Araldite® LY 1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1 [23].

Во табелата 3.2 е даден соодносот на компонентите со кој е работено, додека табела 3.3 ги прикажува карактеристиките на смесата. Вискозноста на смолниот систем на температура од 25 °C е 600-1000 mPas, додека со зголемување на температурата истата се намалува. Времето на работа (Pot-life) на системот е 56 до 62 часа на 23 °C.

За истражувањата во рамките на оваа магистерска работа, смолата во кадата не беше греена, што значи времето за работа беше доста долго. Времето на гелирање зависи од избраната температура за печење (80, 100, 110, 120, 130 или 140 °C). Беше избрано композитните цевки да се печат на температура од 100 °C во време од 6 часа. Бидејќи кадата не беше загреана вискозноста на смолниот систем беше поголем 600-1000 mPas, што е битно да се напомене за регулацијата на соодносот на смола/влакно.

Табела 3.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем [23]**Table 3.1.** Characteristics of the components of the resin system

Araldite® LY 1135 - 1	
Аспект (визуелен)/ Aspect (visual)	Чиста, бледо жолта течност/clear, pale yellow liquid
Боја/Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2
Содржина на епоксид/ Epoxy content (ISO 3000)	5.30 – 5.45 [eg/kg]
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C (ISO 12058 – 1)	10000 – 12000 [mPa s]
Густина на 25°C/Density at 25°C (ISO 1675)	1.15 – 1.20 [g/cm ³]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	> 200 [°C]
Aradur ® 917	
Аспект (визуелен)/Aspect (visual)	Чиста течност/clear liquid
Боја/Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2
Вискозност на 25°C/ Viscosity at 25°C (ISO 12058 – 1)	50 – 10 [mPa s]
Густина на 25°C/ Density at 25°C (ISO 1675)	1.20 – 1.25 [g/cm ³]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	195 [°C]
Accelerator 960 – 1	
Аспект (визуелен)/Aspect (visual)	Светло жолта течност/ Light yellow liquid
Боја/Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 8
Вискозност на 25°C Viscosity at 25°C (ISO 12058 – 1)	150 – 300 [mPa s]
Густина на 25°C Density at 25°C (ISO 1675)	0.95 – 0.95 [g/cm ³]
Точка на топење/Flash point (ISO 2719)	110 - 120 [°C]
Температура на складирање/ Storage temperature	2 - 40 °C [°C]

Табела 3.2. Сооднос на компонентите [23]

Table 3.2. Ratio of the component

Компоненти/Components	Масен удел / Parts by weight	Волуменски удел/ Parts by volume
Araldite® LY 1135-1	100	100
Aradul® 917	90	86
Accelerator 960-1	2 - 3	2.5 – 3.5

Табела 3.3. Карактеристики на смолниот систем [23]

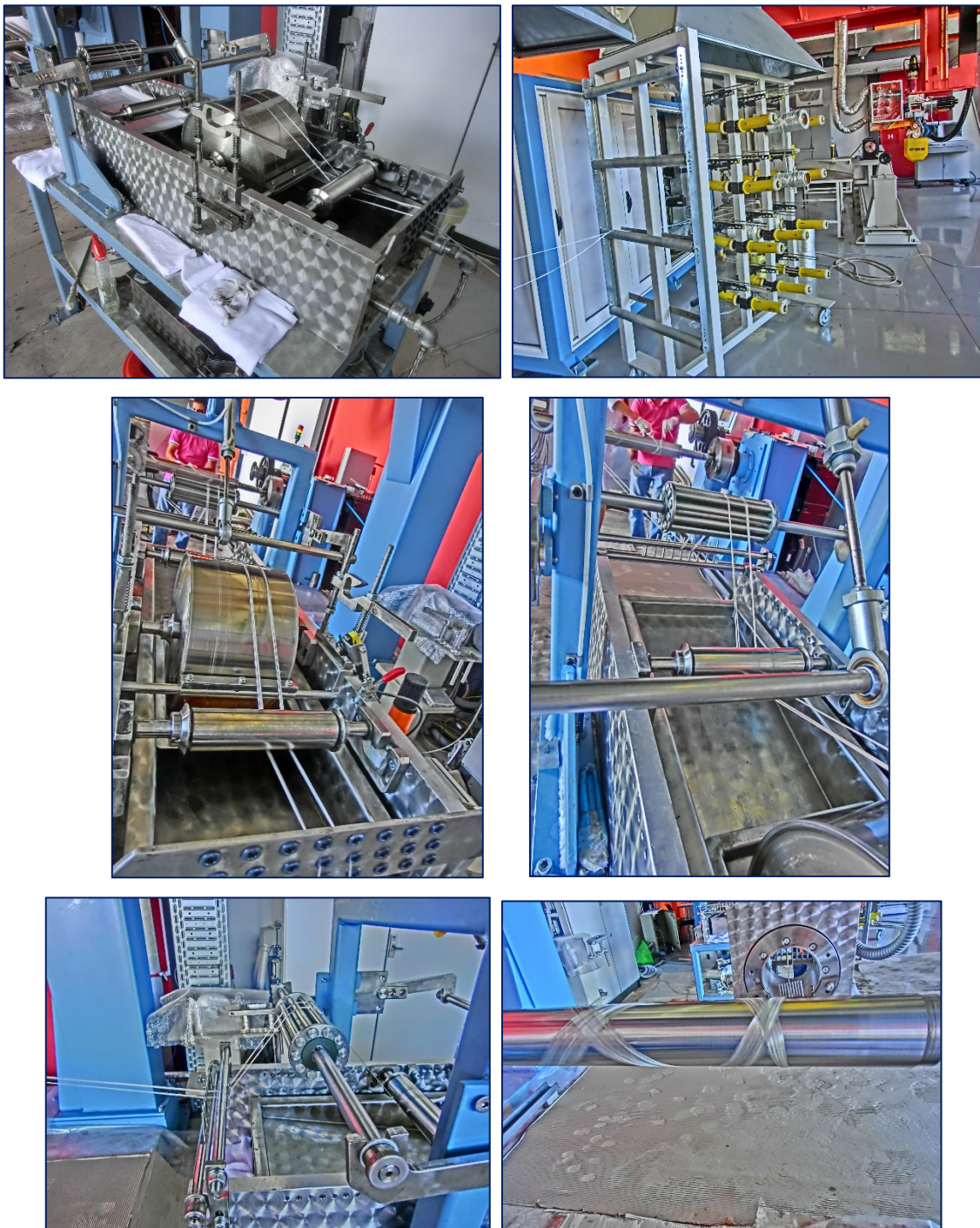
Table 3.3. Characteristics of the resin system

ВИСКОЗНОСТ НА ПОЧЕТНА МЕШАВИНА/ INITIAL MIX VISCOSITY (HOEPPLER, ISO 12058-1B)	[°C] на 25 на 40 на 60		[mPa s] 600-1000 200-300 < 75
ВИСКОЗНОСТ BUILD - UP / VISCOSITY BUILD - UP (HOEPPLER, ISO 12085-1B)	Компоненти [pbw]/ Components [pbw] Araldite® LY 1135-1 Aradul® 917 Accelerator® 960-1	Систем 1/ System 1	Систем 2/ System 2
		100	100
		90	90
		3	5
POT LIFE (TECAM, 65 %RH, 100 G)	[°C] на 23 на 40	[h] [h]	56-62 11-15
			18-24 4-7
ВРЕМЕ НА ГЕЛИРАЊЕ/ GEL TIME (HOT PLATE)	[°C] на 80 на 100 на 110 на 120 на 130 на 140	[min] [min] [min] [min] [min] [min]	Систем 1/ System 1 52-60 10-15 5-8 3-5 1,5-3 1-2
			Систем 2/ System 2

Како зајакнувачки материјал во текот на експриментите се корисета Е - стаклени влакна тип 185P со финост од 1200tex, производ на компанијата Owens Corning. Стаклените влакна се ефикасни од гледна точка јачина/тежина но и многу економични. Стаклените влакна можат да бидат Е-стакло (подобрана електрична спроводливост), С-стакло (висока хемиска отпорност), R-стакло (високи перформанси), А-стакло и Н-стакло (висока специфична јачина на истегнување). Повеќе застапени се Е и S стаклени влакна. Стаклените влакна се најчесто корисен зајакнувач. Тие се отпорни на коризија и имаат ниски трошоци во споредба со другите зајакнувачи.

3.2. Добивање на композитни цевки (Obtaining a composite pipe)

Лабораториските експерименти т.е. производството на композитни цевки за оваа магистерска работа се правеше во лабораториите во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп. За производство на композитните цевки се користеа 10 бобини на Е-стаклени влакна од типот 185P со 1200 tex. Стаклените влакна беа импрегнирани во епоксидниот смолен систем Araldite LY1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1. Примероци композитни цевки со различни дизајни беа произведени со помош на лабораториската машина за намотување на влакна тип MAW FB 6/1 со шест оски, ролерски тип и када за смола, произведена од Микросам АД. Стаклените влакна со одредена тензија поминуваат низ кадата со смола каде што се натопуваат т.е. импрегнираат пред да се намотаат на мандрелот. Потоа, со соодветна брзина на намотување и под одреден агол се намотуваат на ротирачкиот мандрел. Тензијата на влакната е значајна за да се држат во одреден правец кога се намотуваат на површината на мандрелот. Аголот на намотување претставува аголот помеѓу влакното и на линија на површината на мандрелот која е паралелна со оската на мандрелот. Тежинскиот сооднос помеѓу влакната и смолата во сите експерименти беше 75:25 wt. %. После намотувањето на влакната на мандрелот, примероците беа печени со индустриски грејач на 80°C и на 140°C во времетраење од четири часа на двете температури, а потоа беа извлечени од мандрелот. На слика 3.1 претставена е постапката на намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика, а на слика 3.2 изгледот на произведените композитни цевки.



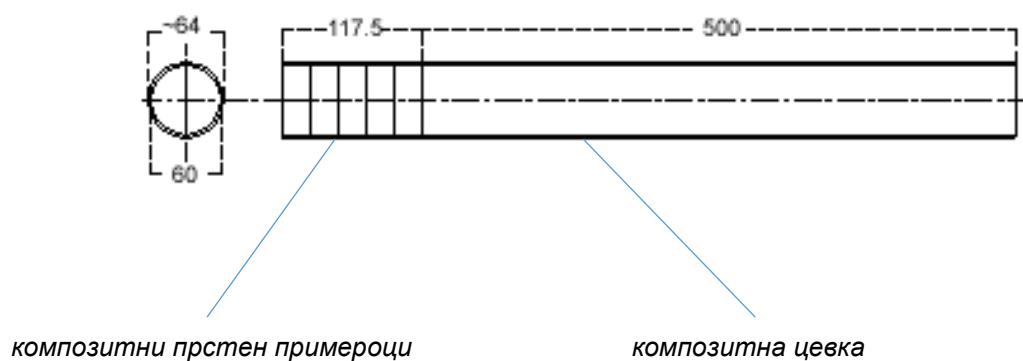
Слика 3.1. Постапка на намотување на влакна во лабораторијата на
Институтот за современи композити и роботика во Прилеп
Figure 3.1. The process of fiber winding in the laboratory of the Institute for
advanced composites and robotics in Prilep



Слика 3.2. Изглед на добиените композитни цевки

Figure 3.2. Appearance of the obtained composite pipe

За да се определат механичките карактеристики односно јачината на истегнување од добиените композитните цевки беа отсечени композитни прстени (слика 3.3) согласно со барањата на стандардот ASTM D2290 и дополнително беше извршена машинска обработка [24].

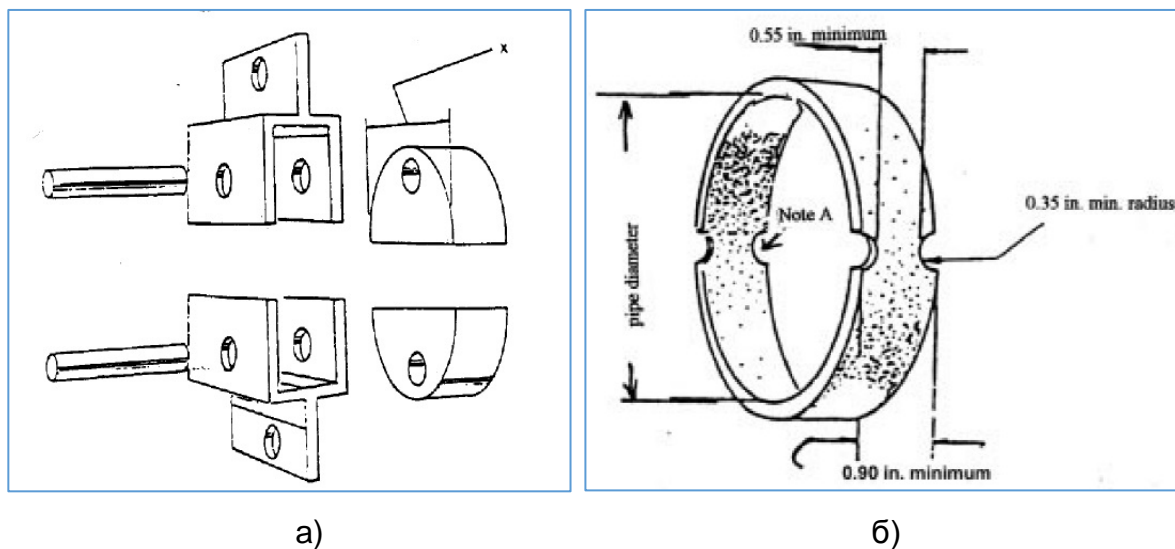


Слика 3.3. Добивање на композитни прстен примероци

Figure 3.3. Receiving of composite ring samples

За испитување на јачината на истегнување на композитните прстен примероци потребно беше да се користи алат, а истиот беше изработен од Микросам АД според барањата на ASTM D2290. На слика 3.4 претставен е шематски приказ на композитниот прстен и алатот за тестирање според ASTM

D2290 [24]. Карактеристични за композитните прстен примероци е тоа што имааше ослабнувања на двете страни под агол од 180° што исто така е во согласност со барањата пропишани во стандардот.



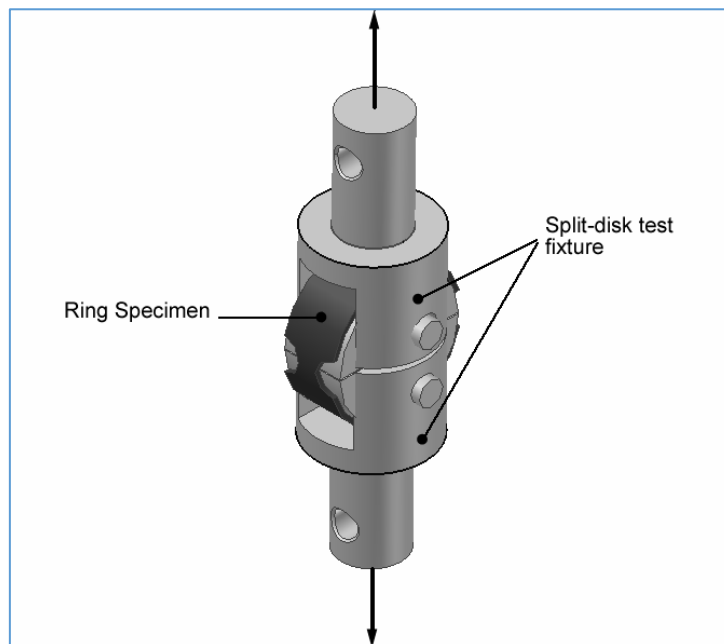
Слика 3.4. а) Алат за тестирање и б) композитен прстен примерок

Figure 3.4. a) Tools for testing and b) composite sample ring

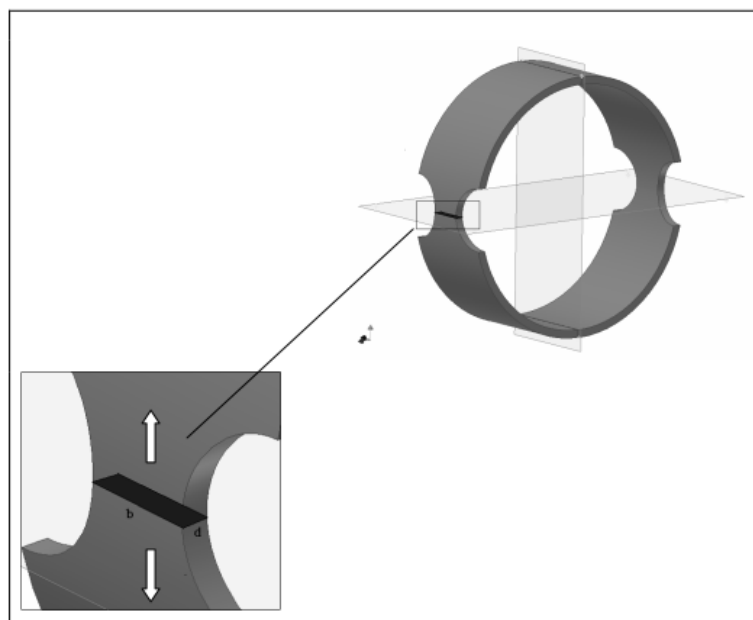
3.3. Определување на јачината на истегнување (Determination of tensile strength)

За испитување на јачината на истегнување на композитните цевки беше користен стандардот ASTM D2290 [24]. Според тој стандард, од секоја композитна цевка беа сечени по пет прстени – примероци за тестирање. За тестирањето на примероците беше изработен помошен алат според барањата на ASTM D2290, како што е прикажано на слика 3.4. . На слика 3.5 даден е шематски приказ на прстен и алат за тестирање според ASTM D2290.

Димензијата на ослабените делови на примероците беше измерена со дигитално подвижно мерило (шублер). За секој примерок се мери дебелината на сидот на четири места, од кои две се на ослабените делови. Ширината на овие делови исто така се мери. Површината на попречниот пресек во ослабените области се пресметува како производ од минимумот на дебелината и ширината (Слика 3.6).



Слика 3.5. Прстен примерок и алат заедно со прстенот за тестирање
Figure 3.5. Ring sample and tool together with the ring sample for testing



Слика 3.6. Попречна површина со која се одредува крајното напрегање на
 истегнување

Figure 3.6. Transverse surface which determines hoop tensile stress

Примероците се поставуваат на специјален алат во форма на дводелен диск, така што ослабените делови на примерокот се во правец на линијата на разделување на двете половини од дискот (слика 3.5).

Тестот е изведен со константна брзина на раздвојување на дисковите половини, се до настанување на кинење на примероците. За секоја испитувана група на примероци се определува средна аритметичка вредност на измерените крајни јачини на истегнување. Се пресметува и средна вредност на модул на еластичност при истегнување и стандардни отстапувања.

Крајната јачина на истегнување на примероците се пресметува со примена на следнава равенка:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{2 \cdot A_m} \quad (3-1)$$

каде:

σ - крајна јачина на истегнување, МПа,

F_{\max} - максимална сила на кинење, N,

A_m - површина на попречниот пресек на ослабениот дел на прстенот, d x b, mm².

Добиените вредности за силата и поместувањето при тестирање на примероците се користат за изработка на графици односно криви на зависноста напрегање - деформација. Наклонот на линеарниот дел од графикот се определува со поставување на права линија со метода на најмали квадрати. Модулот на еластичност се пресметува со равенката:

$$E_h = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (3-2)$$

каде:

E_h - модул на еластичност на прстенот, Гра

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - наклон на линеарниот дел од кривата напрегање – деформација.

За секоја серија на тестови, се пресмета аритметичка средина на сите добиени вредности и се добива "просечен вредност" за одредуваната

карактеристика.

Пресметување на стандардното отстапување се прави на следниот начин:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \quad (3-3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2}{n-1}} \quad (3-4)$$

$$CV = \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (3-5)$$

каде:

s - проценето стандардно отстапување,

CV - коефициент на варијација на примерокот во %,

\bar{X} - аритметичка средина на сет на набљудувања,

X - вредност на поединечно набљудување,

n - број на набљудувања.

Тестовите за сите примероци се изведени на универзална машина за тестирање на јачина на истегнување со максимална сила до 250 KN, која е прикажана на слика 3.7. Брзина на тестирање претставува брзината на раздвојување на двата дискови на машина за испитување во текот на оптоварувањето т.е. задавањето на силата. Брзина на тестирање треба да биде од 0,1 inch/min минимум до максимум од 0,5 inch/min. Условите за испитување на тест примероците се: 23 ± 2 °C или собна температура и релативна влажност на воздухот од $50 \pm 5\%$ и тоа не помалку од 24 часа пред да се почне со тестирањето.



Слика 3.7. Универзална машина за тестирање

Figure 3.7. Universal testing machine

3.4. Определување на скенирачки електронски снимки (SEM) на композитните примероци (Determination of scanning electronic images (SEM) of composite samples)

За испитување на внатрешната структура на материјалот добиен при одреден технолошки процес или при некое механичко оптоварување се користат различни типови на микроскопи. Најпрвин се развиле оптичките микроскопи. Денес голема примена имаат електронските микроскопи. Со нив може да се разгледува меѓусебната поврзаност (интерфејс) на влакна со смола, присуство на пукнатини во матрица, присуството на пори и слично [25-27].

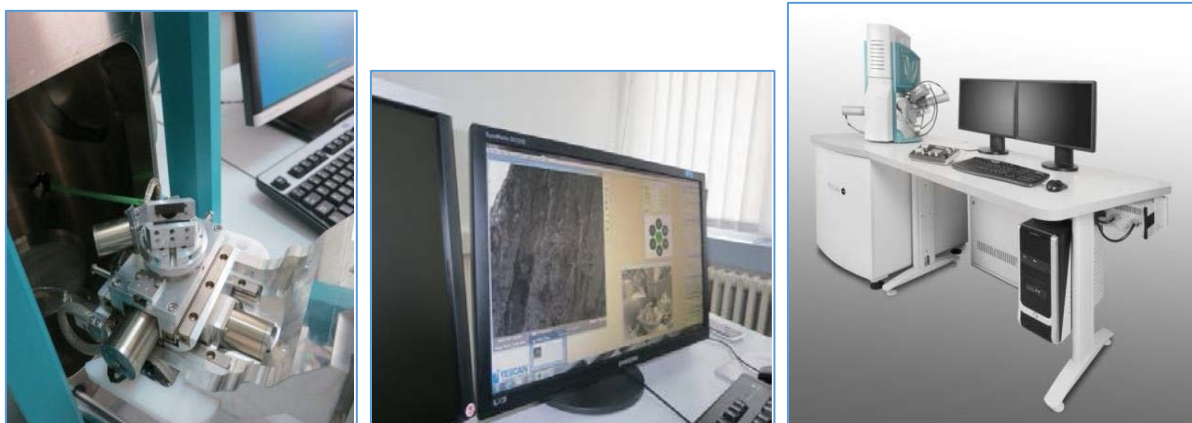
Принципот на работа на овие микроскопи може да се објасни со една споредба. Да замислиме дека се наоѓаме во непозната, потполно затемнета просторија и на располагање имаме само џебна ламба. За да добиеме слика за просторот во кој се наоѓаме, со светилката поминуваме систематски линија по линија од една на друга страна. На тој начин, чекор по чекор, во нашата меморија се создава слика за објектот односно просторијата. Ако го замениме светлосниот сноп на џебната ламба со сноп од електрони, очите со детектор на

електрони, а меморијата со флуоресцентен екран и камера, ќе добиеме опис на основниот начин на работа на SEM микроскопот. За да добиеме слика на екранот на катодната цевка мора да постои одредена разлика на сигналот од различни делови на примерокот. Посветлиот дел од сликата припаѓа на делот од примерокот од кој е емитиран појак сигнал. Топографија на примерокот е визуелно проучување на особините на површината на примерокот:

а) Со секундарни електрони ја набљудуваме топографијата на примерокот чија што површина не е мазна. Топографскиот контраст настанува поради различните емисии на секундарни електрони на испакнатините (светло) и вдлабнатините (сенки). До зголемување на емисијата доаѓа на рабните делови и на ситните честички кои се наоѓаат на површината на примерокот.

б) Топографски контраст може да се добие и со наназад распрснати електрони. Ваквата слика ќе изгледа како слика на примерок набљудуван со паралелен сноп од светлина и ќе има повеќе сенки од сликата добиена со секундарни електрони.

За да се истражат интерфејсот меѓу влакно и матрица, местата на кинење и областите каде не настанало кинење, изработени се слики на скенирачки електронски микроскоп од фирмата Tescan во електронската лабораторија во УГД Штип. На слика 3.8 е даден сканинг електронскиот микроскоп (SEM) кој се користеше за добивање на електронски слики за тестираните композитни прстен примероци за истражувањето во рамките на оваа магистерска работа.



Слика 3.8. Скенирачки електронски микроскоп Tescan

Figure 3.8. Scanning electron microscope Tescan

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА (RESULTS AND DISCUSSION)

Во рамките на оваа магистерска работа беа произведени композитни цевки со користење на 10 бомбини Е – стаклени влакна со финост од 1200 tex. Стаклените влакна пред да бидат намотани на мандрелот беа натопувани со полимерната матрица т.е. со епоксидниот смолен систем односно беа импрегнирани.

Во рамките на ова истражување беа произведени композитни цевки со различен агол на намотување на импрегнираните стаклени влакна. Беа направени различни дизајни на композитни цевки со цел да се покаже улогата на стаклените влакна во добивањето на композитни структури. Другите параметри кои влијаат на крајните карактеристики на композитните цевки како што се: тензијата на влакната, брзината на намотување на влакната, процентот на полимерна матрица со која се натопени влакната, вискозитетот на смолниот систем и друго, беа земени како константни вредности. Тие вредности за останатите параметри беа одредени врз основа на искуството во добивање на композитни структури во Институтот за современи композити и роботика во Прилеп, каде што се изработуваа лабораториските експерименти за овој труд.

Врз основа на тоа беа дефинирани следните параметри за процесирање:

- Тензијата на стаклените влакната при намотувањето беше 110 N.
- Брзината на намотување на импрегнираните стаклени влакна беше земена 21 m/min.
- Масениот сооднос на влакната и смолниот систем за сите композитни цевки беше земен 75:25 mas. %
- Вискозитетот на смолниот систем 800 mPa s.
- Како променлив параметар беше аголот на намотувања и беа направени композитни примероци (цевки) со три различни агли на намотување: 10°, 45° и 90°.

Аголот на намотување е аголот помеѓу влакното и на линија на површината на мандрелот, која е паралелна со оската на мандрелот. Често се преферира спирален агол на намотување на влакната ($\pm\theta$). Меѓутоа многу често може да

се намотуваат влакната под агол блиску до 90° или под агол блиску до 10° (како крајни случаи). Со менување на аголот на намотување на влакната во однос на оската на мандрелот, може да се добијаат композитни структури кои што можат да издржат различни оптоварувања во насока на влакната [28-30].

Во табела 4.1 дадени се ознаките на произведените композитни цевки со различни агли на намотување на влакната, тежината, ширината и дебелината на композитните тест примероци (прстени).

Табела 4.1. Димензии и агол на намотување на примероците

Table 4.1. Dimensions and winding angles of samples

Ознака на примероците/ Sample Designation		Тежина/ Weight, g	Ширина/ Width, mm	Дебелина/ Thickness, mm	Агол на намотување/ Winding angle, °
1	1-1	52.80	14.06	3.64	90
	1-2	52.80	14.12	3.64	
	1-3	53.80	14.12	3.65	
2	2-1	42.20	13.97	3.18	10
	2-2	43.00	13.85	3.14	
	2-3	43.70	14.00	3.14	
3	3-1	53.60	14.01	3.18	45
	3-2	53.80	13.90	3.16	
	3-3	53.80	14.01	3.16	

4.1. Определување на физичко - механички карактеристики на композитните цевки (Determination of physical - mechanical properties of composite pipes)

4.1.1. Определување на содржина на стаклени влакна во композитните примероци (Determination of fiber content in the composite samples)

Определувањето на содржината на влакна во композитните материјали е значајно затоа што количество на влакна во композитната структура може значајно да влијае врз нивната јачина. Исто така од особена важност е и доволната количина на полимерна матрица во композитот за да има добро натопување и поврзување на влакната. Поголемата содржина на влакна обезбедува поголема јачина на композитната структура. Меѓутоа, постои одреден минимален односно максимален удел на влакна кој може да биде во композитната структура за да биде ефикасен зајакнувачки материјал. Имено, доколку содржината на влакна во композитот надминува некоја крајна вредност (минимална или максимална) односно доколку е помалку од некоја минимална вредност, тогаш може да се добие композит со мала јачина, затоа што јачината ќе зависи во голем дел од јачината на полимерната матрица. Од друга страна, кога пак влакната се во многу голем процент во композитот односно повеќе од некоја максимална вредност тогаш тие нема да бидат меѓу себе добро поврзани затоа што нема доволно количина на полимерна матрица за нивно поврзување и на тој начин повторно ќе се добие композитот кој нема да има добра јачина. Во овој случај зајакнувачката фаза не е ефективно искористена. Следењето на присуството на полимерна матрица во композитната структура е исто така важно за да се обезбеди конзистентност на процесот на производство на композитни материјали [30-32].

За мерење на содржината на влакна во композитните примероци беше користен стандардот ASTM D3171 [29]. За да може да се определи содржината на влакна во композитните примероци потребно беше да се знае теоретската густина на конститутивните материјали односно на зајакнувачките влакна и на смолниот систем, а со тоа може да се определи и теоретската густина на композитот. Индивидуалните густини на конституентите најчесто се добиваат

како готови вредности од производителот на смолата и на зајакнувачките влакна.

За определувањето на густината на композитниот материјал, примерок со определени димензии и претходно измерена тежина се става во лонче и се гори (жари) на 600 °C во печка се додека не останат само влакната односно се додека полимерната матрица не изгори комплетно. Потоа, лончето со примерокот се лади и се мери неговата тежина. Содржината на смола може да се пресмета како масен процент од расположливите податоци. Најчесто големината на примерокот кој се гори е со димензии: ширина 2,54 cm со висина 2,54 cm x дебелина.

Густината на композитните примероци беше пресметани со користење на следната равенка:

$$T = \frac{100}{(R/D + r/d)} \quad (4-1)$$

каде:

T = густина на композитот, g/cm³,

R = масен удел на смола, %,

r = масен удел на влакна, %,

D = густина на смола, g/cm³,

d = густина на зајакнувачот, g/cm³.

Резултатите од испитаните масени и волуменски удели на стаклените влакна и на епоксидна смола во добиените композитни примероци се дадени во табела 4.2. При пресметките земена е густина на стаклените влакна 2,56 g/cm³ и густина на епоксидната смола 1,15 g/cm³. Резултатите од пресметаната густина на композитните примероци се дадени во табела 4.3.

Од добиените резултати за содржина на конституентите во композитните примероци може да се заклучи дека има многу добра содржина на влакна во добиените примероци и добра содржина на смола, а тоа укажува дека стаклените влакна се добро поврзани и дека таквата структура ќе резултира во материјал со добри механички карактеристики.

Табела 4.2. Масени и волуменски удели на конститuentите во композитните примероци

Table 4.2. Mass and volume content of the constituents in the composite samples

Ознака на примероците/ Sample designation		Маса пред жарење/ Weight before burning, g	Маса по жарење/ Weight after burning, g	Масен удел на vlakна/ Mass fiber content, mas. %		Масен удел на смола/ Mass ratio content, mas. %	Волум. удел на vlakна/ Volume fiber content, vol. %	Волум. удел на смола/ Volume ratio of resin, vol. %
1	1-1	2,6710	2,0477	76,5519	76,68	23,32	59,64	40,36
	1-2	2,5973	1,9972	76,8952				
	1-3	2,5468	1,951	76,6059				
2	2-1	2,1142	1,6919	80,0255	80,54	19,46	65,02	34,98
	2-2	1,8916	1,5385	81,3333				
	2-3	2,0260	1,6260	80,2567				
3	3-1	2,8000	2,0145	71,9464	72,17	27,83	53,81	46,19
	3-2	2,5455	1,8367	72,1548				
	3-3	3,0461	2,2057	72,4106				

Табела 4.3. Измерена густина на композитните примероци

Table 4.3. Measured density of the composite samples

Ознака на примероците/ Sample designation	Измерена густина/ Measured composite density, g/cm ³
1	1,9909
2	2,0670
3	1,9087

4.1.2. Определување на јачината на истегнување на композитните прстен примероци (Determination of hoop tensile strength of the composite pipe samples)

Определувањето на крајната јачина на истегнување на композитните прстени со помош на сплит диск методата беше една од целите во оваа магистерска работа. Тестови за јачината на истегнување беа направени на композитни прстени добиени со агол на намотување на влакната од 10°, 45° и 90°. Тестовите беа правени со помош на универзална машина за тестирање со брзина на растегнување од 5 mm/min. Беа тестирани по три примероци од секоја група, а потоа беше одредена средната јачина за секоја група композитни прстени. Врз основа на добиените податоци беше определено однесувањето на различно дизајнираните композитни примероци. Крајната јачина на истегнување на композитните примероци беше определена со користење на формулата (3-1):

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{2 \cdot A_m}$$

Резултатите добиени од извршените тестирање се дадени во табела 4.4. На слика 4.1. прикажана е постапката при тестирањето прикажана е постапката при тестирањето односно дадено е тестирањето на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 10 °. Додека тестирањето на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 90 ° и 45 ° е прикажано на слика 4.2.



Слика 4.1. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 10 °

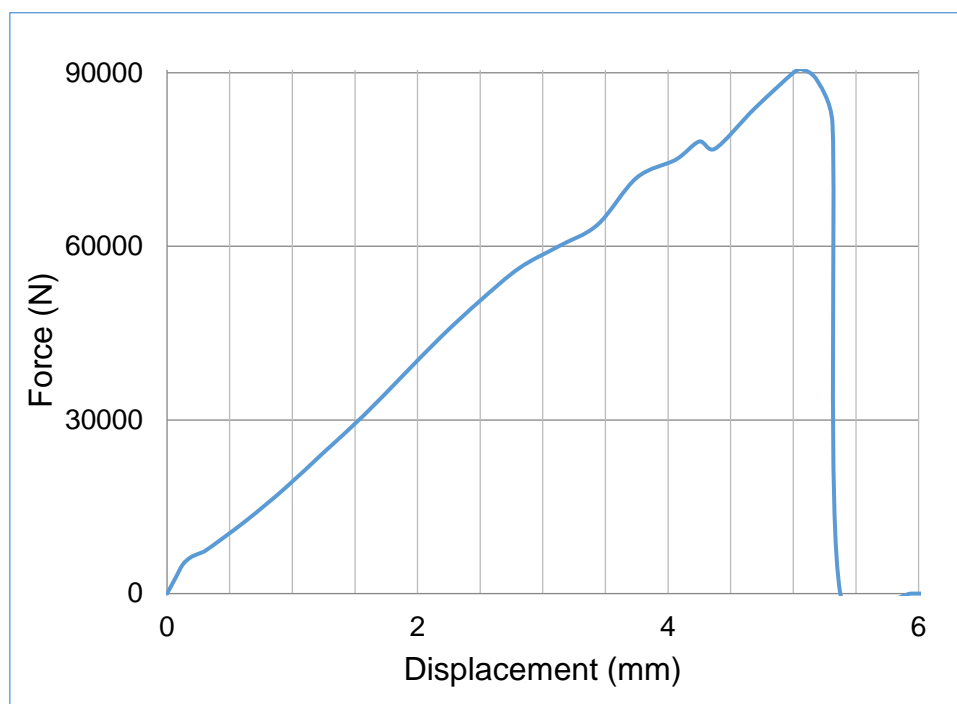
Figure 4.1. Testing of the composite ring samples with winding angle 10 °

Табела 4.4. Резултати за крајната јачина на истегнување од сплит-диск
тестовите за композитните примероци

Table 4.4. Hoop tensile strength results of split-disk tests for composite specimens

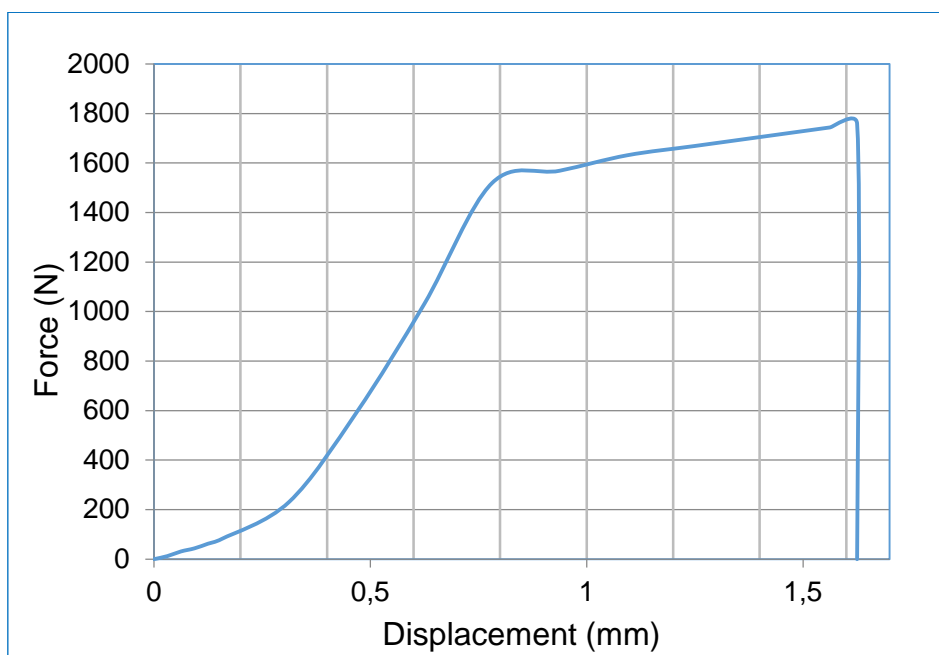
Ознака на примероците/ Sample Designation		Максимална сила/ F_{\max} , N	Јачина на истегнување/ Tensile strength, MPa
1	1-1	94500	923.24
	1-2	90250	877.97
	1-3	93000	902.25
2	2-1	1600	18.00
	2-2	1250	14.34
	2-3	1759	20.00
3	3-1	25000	280.57
	3-2	24225	275.76
	3-3	24400	275.57

На слика 4.2. прикажани се добиените криви сила – поместување на некои испитувани примероци: 1-2, 2-3 и 3-2.

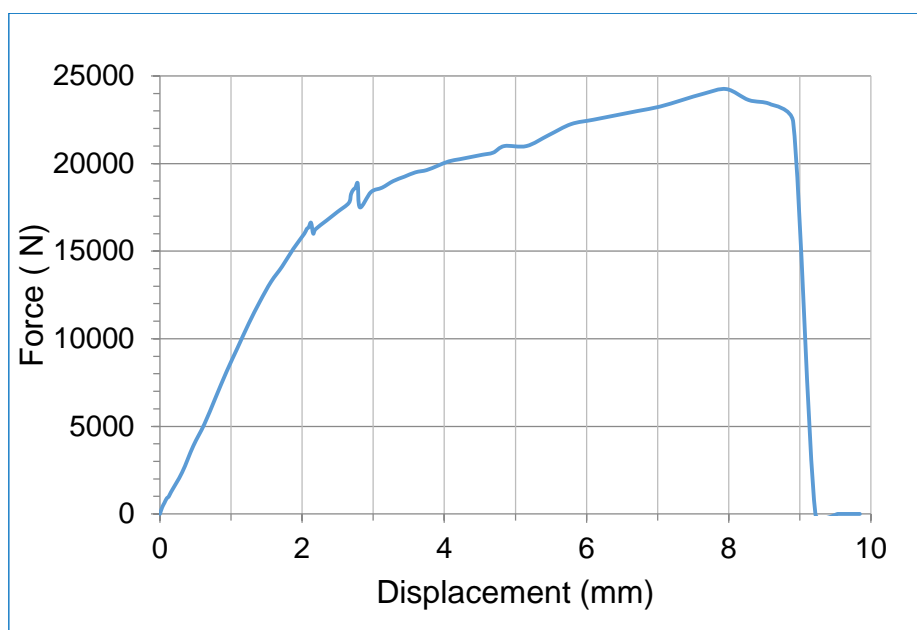


крива сила – поместување за примерок 1-2

force and displacement of sample 1-2

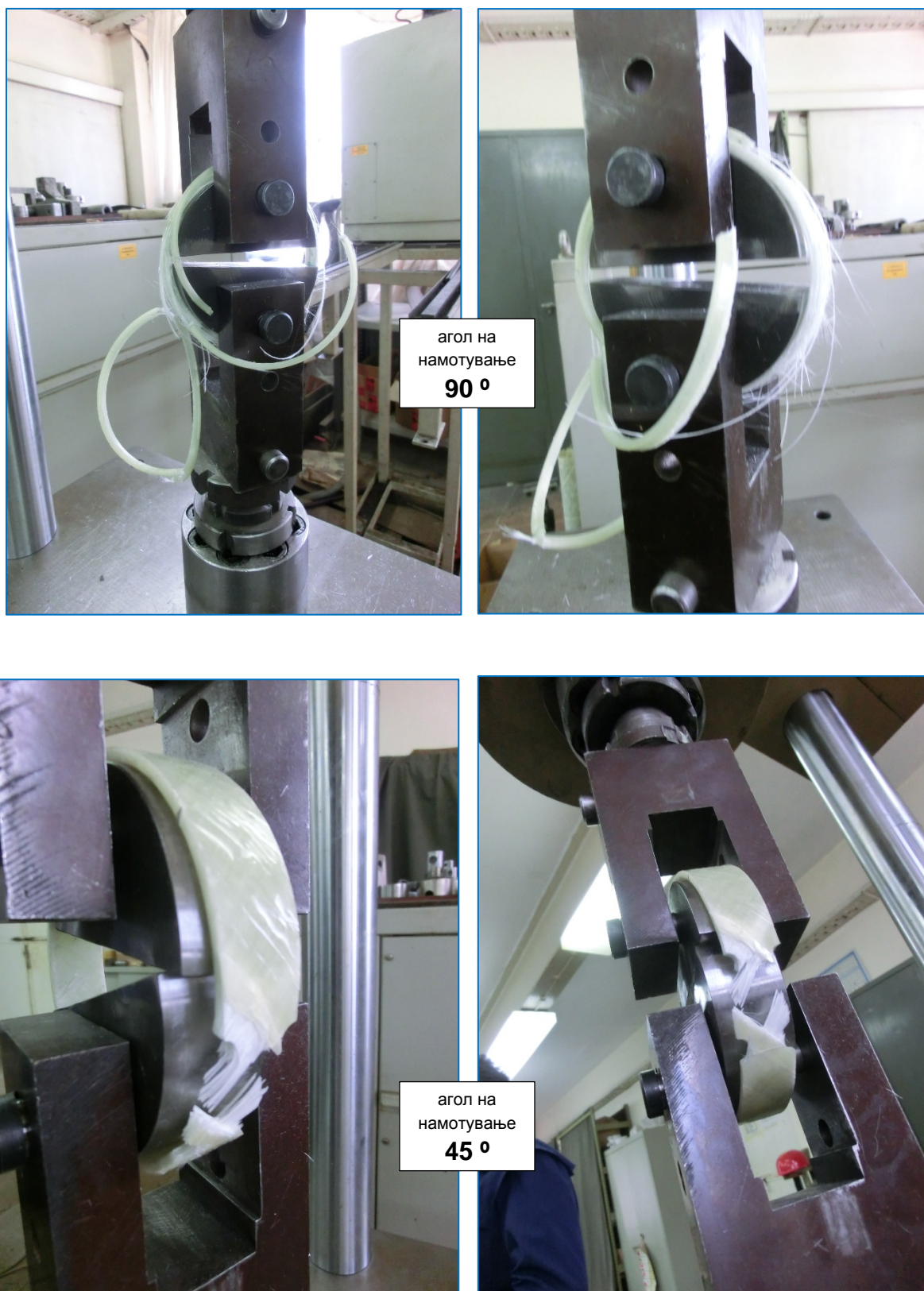


крива сила – поместување за примерок 2-3
force and displacement of sample 2-3



крива сила – поместување за примерок 3-2
force and displacement of sample 3-2

Слика 4.2. Сила – поместување криви од сплит диск тестовите добиени од универзалната машина за тестирање
Figure 4.2. Force and displacement graphs of split disk tests from universal tensile testing mach



Слика 4.3. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 45 ° и 90 °

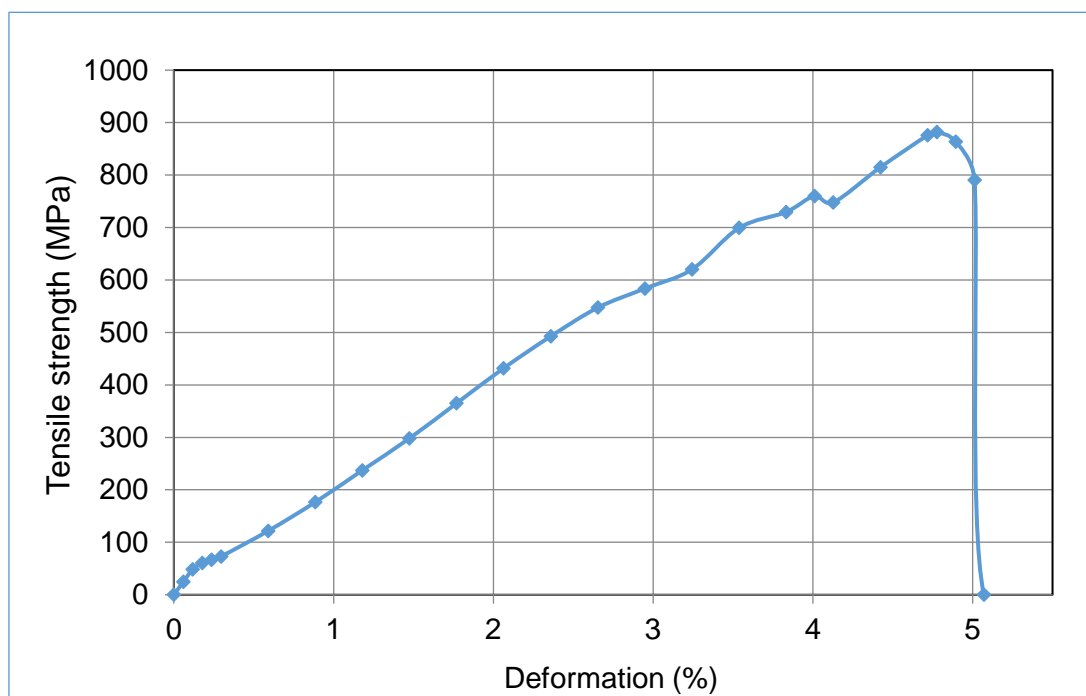
Figure 4.3. Testing of the composite ring samples with winding angle 45 ° and 90 °

Од кривите сила-поместување кои се добиени од универзалната машина за тестирање и со помош на равенки (3-1) се пресметуваат кривите напрегање-деформација. На слика 4.4. прикажани се добиените криви напрегање – деформација на некои испитувани примероци: 1-2, 2-3 и 3-2.

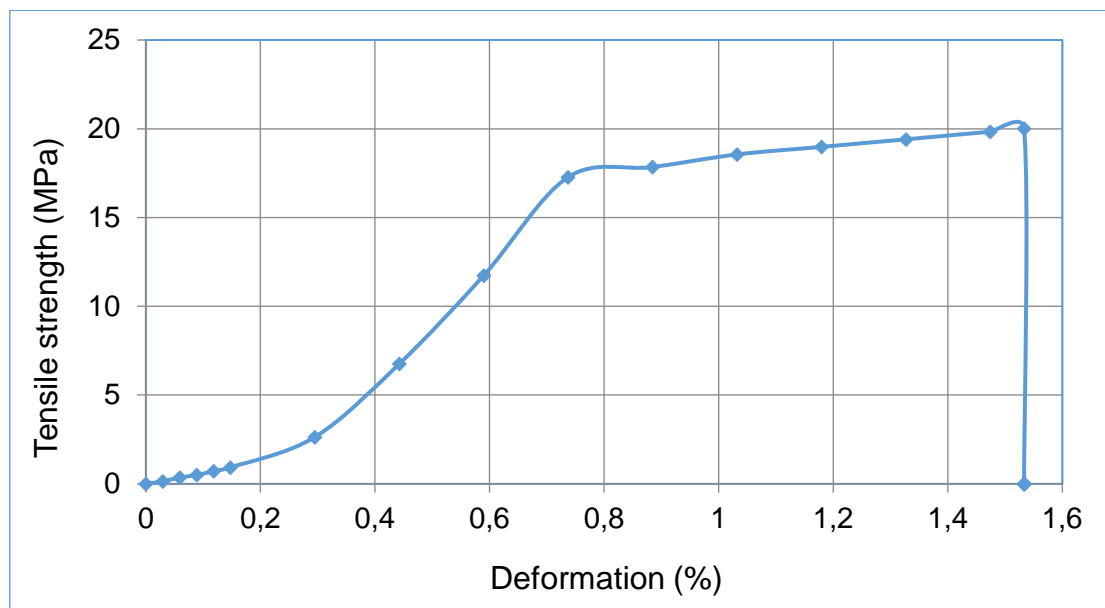
Вакви дијаграми како што се прикажани на слика 4.2 и слика 4.4 се добиени за сите тестирани композитни прстени, но во магистерскиот труд се прикажани само по еден од серијата тестирања за трите типови композитни примероци.

За сите тестирани примероци беше одреден и модулот на еластичност од добиените криви напрегање – деформација како што е дадено на слика 4.5. Кривата напрегање - деформација има еден линеарен дел. Со примена на методот на најмали квадрати се опишува линеарна крива за да се пресмета модулот на еластичност (E). Освен овој начин за пресметка на E се користи и равенка (3-2). Права линија се повлекува од местото каде започнува пораст на напрегањето. Од линеарната крива која се добива со корелација на грешка $\sim R=0,99$ се пресметува модулот на еластичност (слика 4.5).

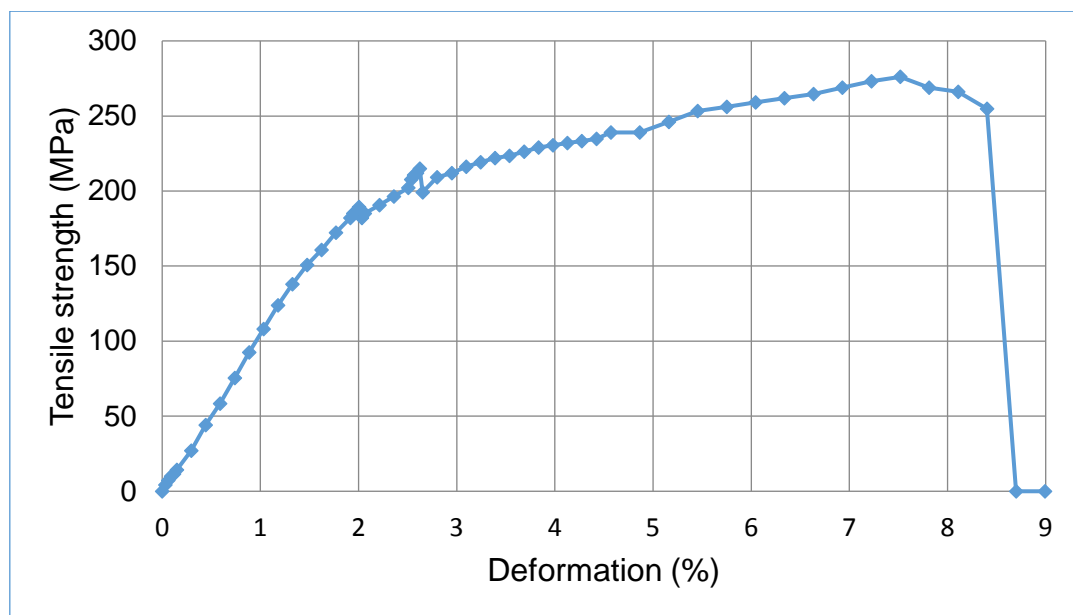
Средните вредности за секој тест - експеримент со три повторувања се прикажани во табела 4.5.



крива напрегање – деформација за примерок 1-2
stress and strain of sample 1-2



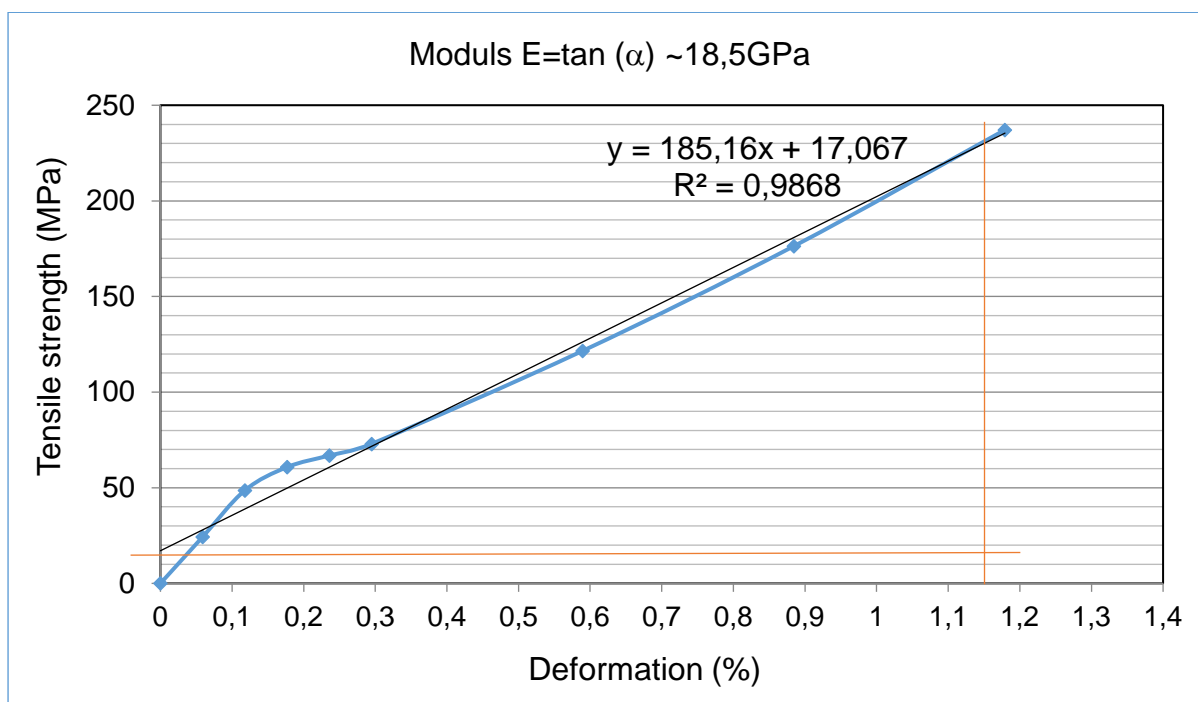
крива напрегање – деформација за примерок 2-3
stress and strain of sample 2-3



крива напрегање – деформација за примерок 3-2
stress and strain of sample 3-2

Слика 4.4. Напрегање – деформација криви на композитни прстен примероци добиени од универзалната машина за тестирање

Figure 4.4. Stress and strain graphs of composite tubular samples from universal tensile testing machine



Слика 4.5. Определување на модул на еластичност за комозитен примерок со ознака 1

Figure 4.5. Determination of modulus of elasticity for the composite sample with designation 1

Табела 4.5. Средни вредности од сплит-диск тестовите за композитните примероци

Table 4.5. Average values of split-disk tests for composite specimens

Ознака на примероците/ Sample Designation	Макимална сила средна вредност/ F_{\max} average, N	Јачина на истегнување средна вредност/ Tensile strength average, MPa	Модул на еластичност/ Modul us of elasticity, GPa
1	92583.33	901,15	18,5
2	1536.25	27,45	0,61
3	24541.67	277,3	9,64

Од резултатите од тестовите дадени во табелите 4.4 и 4.5 може да се забележи дека композитните прстени добиени со агол на намотување од 90° имаат највисока вредност за максималната сила на растегнување до кинење на прстенот. Додека, тест примероците од серијата композитни прстени добиени со агол на намотување на влакната од 10° покажаа многу пониски вредности за максималната сила и тоа околу 3 % од силата на истегнување за примероците со агол на намотување 90° . Бидејќи композитните материјали се типични анизотропни материјали со промена на аголот на намотување на влакната се очекува и промена на перформансите на структурата. Кога композитниот материјал е оптоварен во насока на влакната покажува најдобри механички карактеристики. Во услови кога прстенеста структура се наоѓа под внатрешен притисок, како се менува аголот на намотување се очекува таа да покаже анизотропно однесување. Кај прстенестата структура како се зголемува аголот на намотување на влакната тие доаѓаат блиску до насоката на оптоварување, а за агол на намотување 90° влакната се во иста насока со силата која дејствува на структурата и затоа таа конфигурација покажува највисока јачина. Од друга страна како што се зголемува аголот на намотување на влакната односно јачината во лонгитудинална насока, отпорноста на композитниот прстен во аксијална насока ослабува. Внатрешниот притисок во композитните цевки претставува комбинирано оптоварување на структурата во двете насоки и затоа максимални перформанси може да се постигнат кога ќе се избере агол на намотување на влакната што може да ја оптимизира отпорноста на прстенот во сите насоки [30-35]. Композитните прстени добиени со агол на намотување од 45° покажаа пониски вредности за максималната сила на истегнување до кинење за околу 60% од примероците намотани со агол 90° , но околу три пати повисока максимална сила од тие намотани со агол 10° .

Од сликите 4-2 каде што се претставени кривите сила – поместување може да се види дека кривата за примерокот со ознака 1 е приближно линеарна со задавање на висока сила на истегнување и до пукање на примерокот. При тестирањето и во моментот на пукање на примерокот имаше и силен звук и целосна деструкција на прстенот. Кај кривата сила – поместување за примерокот со ознака 3 се забележува линеарен дел се до пукање на некои

слоеви од композитната структура. Меѓутоа, структурата не е комплетно деструктурирана и може да издржи понатамошно оптоварување кое доведува до поголемо поместување на структурата со помали сили и на крај пукање на прстенот. Деструкцијата на овие примероци е различна во споредба со претходните, а прстенот покажа најголема еластичност и одлична отпорност на не многу висока сила на истегнување. Композитните прстени со ознака 2 покажаа најмала отпорност на силите на истегнување. Всушност, тоа е отпорност која се должи на јачината на епоксидната смола затоа што влакната во тие примероци се во правец каде што нивната ефикасност не е искористена. При пукање на овие примероци не се создаваше звук, а кривите сила – поместување имаат мал линеарен дел со мал наклон кој продолжува во билинеарен облик се до пукање на примерокот.

Од сите добиени и анализирани резултати може да се заклучи дека механичките својства на композитните цевки зависат од аголот на намотување на влакната во технологијата за добивање на композитни структури со намотување на филаменти. Имено, поголемите агли на намотување на влакната обезбедуваат композитни цевки со повисоки јачини на истегнување.

На слика 4.6. дадени се сликите на испитани композитни прстени добиени со агол на намотување 90° , 10° и 45° и начинот на нивна деструкција после тестирањето.

Може да се забележи дека постои различна деструкција кај примероците со различен агол на намотување. Имено, кај примероците со агол на намотување од 90° силата на истегнување делува во правец на влакната и затоа отпорот е поголем односно јачината е поголема и зависи од јачината на влакната. Додека, кај примероците со агол на намотување од 10° силата на истегнување делува нормално на намотаните влакна и отпорот е помал односно јачината е помала.



Композитен прстен со ознака 1



Композитен прстен со ознака 2



Композитен прстен со ознака 3

Слика 4.6. Приказ на деструктурирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на истегнување

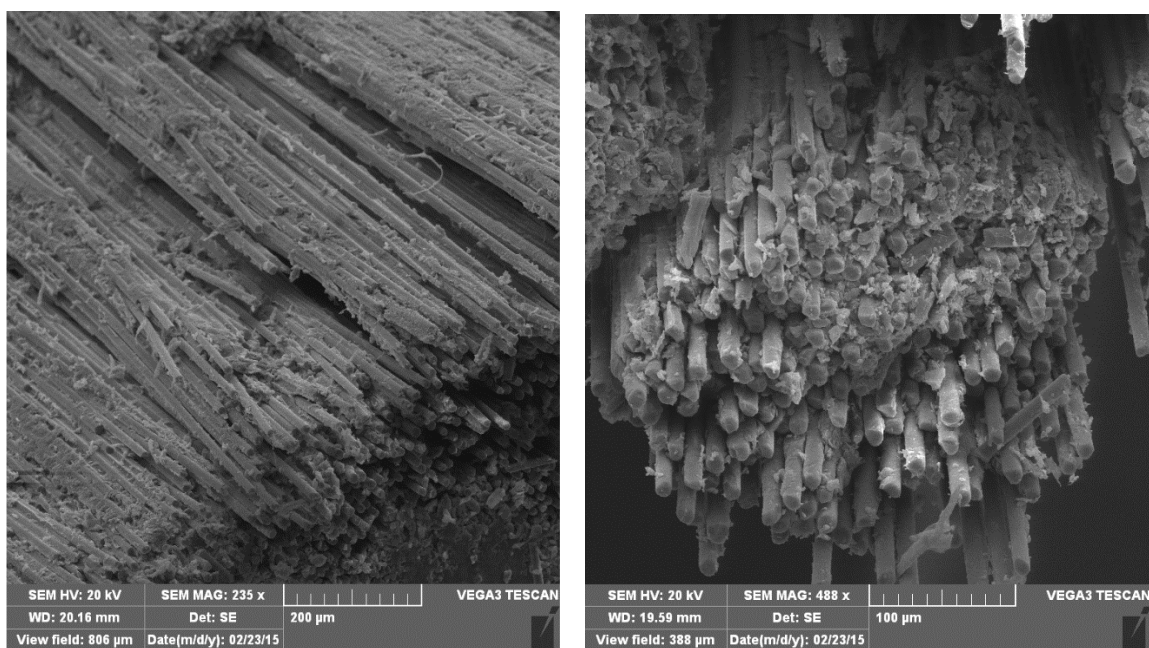
Figure 4.6. Failure of samples with different angle of winding, after examining the tensile strength

4.2. Сканинг електронска микроскопија (СЕМ) на тестираните композитни прстени (Skaning electron microscopy (SEM) of the tested composite rings)

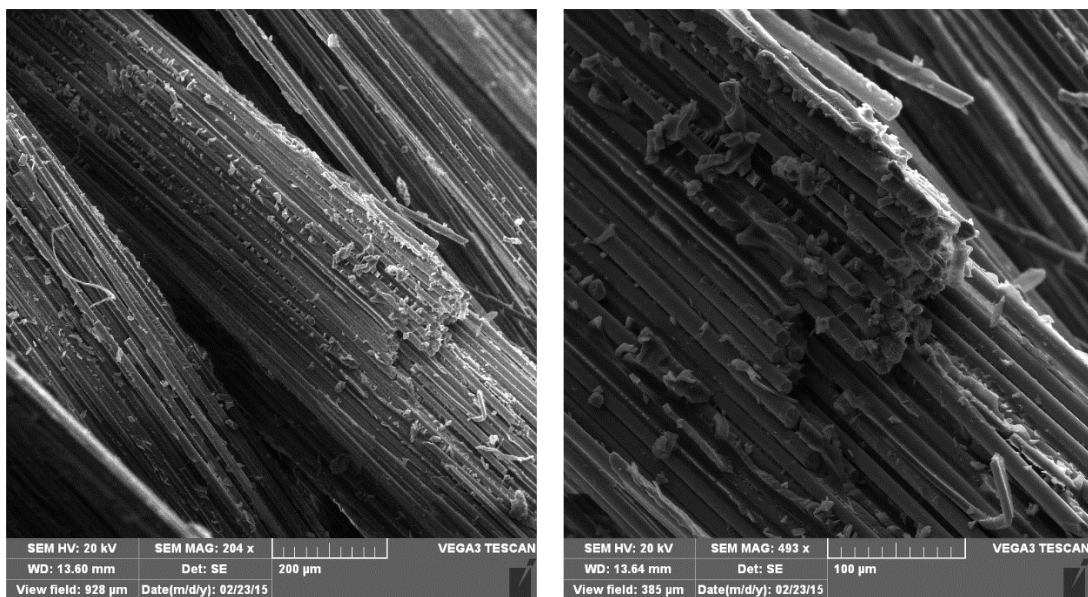
Анализата со помош на сканинг електронската микроскопија (СЕМ) беше направена со цел да се види дали стаклените влакна се добро натопени со смола односно дали се добро импрегнирани и каква е поврзаноста меѓу нив во текот на процесот на нивно намотување.

Направени беа снимки во надолжен и попречен правец на тест примероците со различни зголемувања. Снимките беа направени на веќе тестираните примероци. Добиените СЕМ микрофотографии се прикажани на слика 4.7

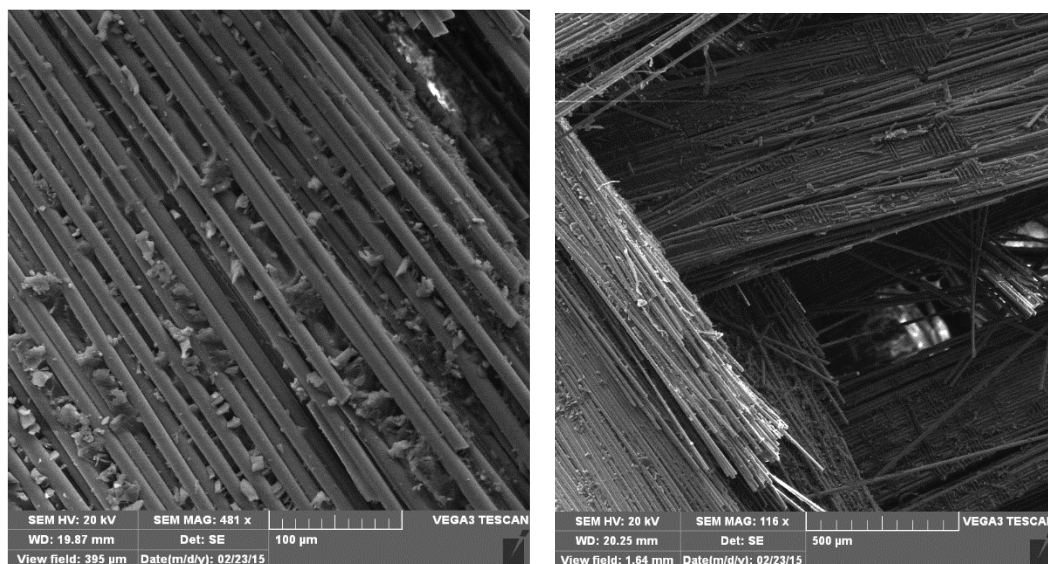
Од добиените СЕМ слики за примероците со агол на намотување од 90° јасно се гледа паралелноста и поврзаноста на влакната и матрицата кои се во насока на дејствување на силата, како и прекилот на влакната. Кај СЕМ снимките за примероците со агол на намотување од 10° може да се забележи многу мало оштетување на влакната затоа што прекилот е направен преку пукање на матрицата. СЕМ микрофотографиите за примероците со агол на намотување од 45° покажуваат добро поврзување на влакната со матрицата. Јасно се гледа аголот на намотување на влакната и одредено раслојување со прекин и на влакната и на матрицата.



а) Композитен прстен со ознака 1



б) Композитен прстен со ознака 2



в) Композитен прстен со ознака 3

Слика 4.7. СЕМ микрофотографии на пукнатите делови од композитните прстен примероци

Figure 4.7. SEM photographs of the cracked parts of the composite ring samples

5. ЗАКЛУЧОК (CONCLUSION REMARKS)

Врз основа на направеното истражување во рамките на оваа магистерска работа може да се заклучи следното:

- Беше направена анализа на текстилни влакна кои можат да се користат како зајакнувачка фаза во добивање на композитна структура. Врз основа на направената анализа беа избрани стаклените влакна како најдостапни и најекономични за правење на експерименти.

- Беше даден преглед и основни особености на полимерните матрици кои можат да се користат за добивање на композитни материјали. Како полимерна матрица за експериментите беше избрана епоксидна смола.

- Беше избрана технологијата на намотување на влакна како постапка за добивање на композитни структури. Со оваа технологија се добиваат најчесто композитни структури во облик на цевки со различни дијаметри. Во избраната технологија се користат континуирани влакна со што може да се види ефикасноста од примената на влакна во добивање на композитни цевки.

- Беа направени композитни цевки врз основа на стаклени влакна и епоксидна смола со различни дизајни. Имено, беа направени композитни цевки со различен агол на намотување на влакната и тоа од: 90°, 10° и 45°.

- За сите произведени композитни цевки беа тестирани физичко механичките карактеристики.

- За сите тест примероци беше направена анализа за содржината на влакна и беше добиено дека сите примероци имаат масен удел на влакна од околу 75%.

- За сите произведени композитни примероци беше тестирана јачината на истегнување како карактеристика која најчесто се бара да биде исполнета од композитните цевки.

- Од извршените тестирања за јачина на истегнување беше заклучено дека композитните цевки со агол на намотување од 90 ° покажуваат највисока јачина. Додека, композитните цевки со најмал агол на намотување од 10 ° покажаа многу помала јачина на истегнување. Како оптимално решение претставуваат композитните цевки добиени со агол на намотување од 45 ° бидејќи се оптимално издржливи на внатрешни притисоци во сите правци како резултат на спиралното намотување на влакната.

- Добиените резултати покажаа дека јачината на композитните цевки многу зависи од аголот на намотување на влакната. Поголемиот агол на намотување на влакна доведува до поголеми јачини кај композитните цевки и обратно.
- Беше направена и СЕМ микроскопска анализа на примероците после тестирање. Беа направени снимки во надолжна и попречна насока и на местата каде е настанат прекин во текот на испитувањата.
- Од направените СЕМ микрофотографии јасно се гледа структурата на композитните слоеви како и настанатите прекини на влакната и матрицата.
- СЕМ микрофотографиите покажаа дека влакната се добро импрегнирани со смола и дека се добро поврзани меѓу себе.
- Преку избраните влакна за добивање на композитни цевки и преку применетите методи за анализи се покажа значајноста од примената на влакна како зајакнувачка структура во композитните материјали.
- Со технологијата на намотување на влакна се добива можност за производство на краен производ најчесто за производството на цилиндрични и сферични форми т.е. се користи за производство на резервоари и цистерни за хемикалии и гориво, како и за производство на цевки. Цевките добиени со процес на намотување на влакна се добра замена за корозивните челични и метални цевки за масло, гас и вода. Освен тоа, цевките добиени со овој процес се трајни и издржливи дури и на високи притисоци.

6. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- 1) A. C. Long (2005). Design and manufacture of textile composites. Woodhead Publishing Limited.
- 2) L. L. Sobrinhoa, V. M. Caladob and F. L. Bastian. Development and Characterization of Composite Materials for Production of Composite Risers by Filament Winding. *Materials Research*, 14(3): 287-298, 2011.
- 3) Daniel Gay, Suong V. Hoa (2007) Composite Materials: Design and Applications, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis.
- 4) M. M. Schwartz, (1984) "Composite materials handbook" McGraw-Hill.
- 5) G.I. Williams, R.P. Wool, *Appl. Comp. Mater.*, **7**, 421 (2000).
- 6) A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal, *Composite Interfaces*, **8**, 313 (2001).
- 7) Suong V. Hoa, (2009) "Principles of the manufacturing of composite materials" by DEStech Publications, Inc., Chapter 5 page 205-231, 343.
- 8) Stanley T. Peters, Yu. M. Tarnopol'skii, A. I. Beil (1998), "Handbook of Composites" Chapter - Filament Winding, Pages 456-475 Springer US.
- 9) N. Akkus, G. Genc and C. Girgin. Control of the presentation in Filament winding process. *Acta mechanica et automatica*, vol.2 (3), 2008.
- 10) D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Elsevier Science Limited, Composites Part A 28A 1035-1037 G', 1997.
- 11) Stanley T. Peters, "Composite Filament Winding", ASM International, 2011, ASM International, 167 pages.
- 12) Koussios, S. (2004), Filament Winding: a Unified Approach, Published and distributed by: DUP Science. 400.
- 13) Emrah Salim Erdiller, (2004). Experimental investigation for mechanical properties of Filament wound composite tubes, Master thesis, 129p.
- 14) W. Chen, Y. Yu, P. Li, C. Wang and X. Yang. Effect of new epoxy matrix for T800 carbon fiber / epoxy filament wound composites. *Elsevier Composites Science and Technology* 67 2261–2270, 2007.
- 15) D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Elsevier Science Limited, Composites Part A 28A 1035-1037 G', 1997.

- 16) W. Polini and L. Sorrentino. Influence of winding speed and winding trajectory on tension in robotized filament winding of full section parts. *Composites Science and Technology*, 1574-1581. DOI:10.1016, 2005.
- 17) N. Akkus, G. Genc and C. Girgin. Control of the presentation in Filament winding process. *Acta mechanica et automatica*, vol.2 (3), 2008.
- 18) L. L. Sobrinhoa, V. M. Caladob and F. L. Bastian. Development and Characterization of Composite Materials for Production of Composite Risers by Filament Winding. *Materials Research*, 14(3): 287-298, 2011.
- 19) Davies, I. J., & Hamada, H. (2001). Flexural properties of a hybrid polymer matrix composite containing carbon and silicon carbide fibres. *Advanced Composite Materials*. 10 (1), 77-96.
- 20) Sudarisman, & Davies, I. J. (2008). Flexural failure of unidirectional hybrid fibre–reinforced polymer (FRP) composites containing different grades of glass fibre. *Advanced Materials Research*. 41-42, 357-362.
- 21) Lee, S. W., Lee, S. G., Bae, D., & Kim, B. S. (2005). Flexural characteristics of filament wound GFRP composite bridge desk. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers Magazine*. 25 (5A), 751-760.
- 22) Kirsi Turto, Tommi berg, Jyrki Vuorinen. (2009). Influence of the fibre tension on the properties of the filament wound tubes, *SAMPE EUROPe 30 International Jubilee Conference and forum*. SEICO 09, 635-641.
- 23) www.huntsman.com.
- 24) ASTM Standards D 2290-00, “Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- 25) C. Dong, J. Duong, I.J. Davies, Flexural Properties of S-2 Glass and TR 30S Carbon Fiber – Reinforced Epoxy Hybrid Composites, *Polym. Compos.*, 2014, 33: 773-781.
- 26) E. Sideridis, G.A. Papadopoulos, Short-Beam and Three-Point-Bending Tests for the Study of Shear and Flexural Properties in Unidirectional-Fiber-Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 93: 63-74.
- 27) G. Belingardi, M.P. Cavatorta, C. Frasca, *Compos. Sci. Techol.*, 2006, 66: 222–232.
- 28) Annual Book of ASTM Standards D 3039/D 3039M-00, ‘Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites’.

29) Annual Book of ASTM Standards D 3171, 'Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials'.

30) Д. Димески, В. Сребренкоска, е-библиотека Механички својства на текстилни материјали, Универзитет Гоце Делчев – Штип, 2014.

31) A. Dorigato, A. Pegoretti, J. Compos. Mat., 2014, 48: 1121–1130.

32) S. Putic, M. Stamenovic, M. Zrlic, M. Bajaceta, Bending properties of Glass – Polyester Composite Pipes, 3th International Conference on Deformation Processing and Structure of Materials, Belgrade, 2007.

33) Simona Naseva, Vineta Srebrenkoska, Svetlana Risteska, Maja Stefanovska, Sara Srebrenkoska, *Effect of winding angles on mechanical properties of filament wound pipes*, In: IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry, Jahorina, Bosnia and Hercegovina, 2015.

34) Simona Naseva, Vineta Srebrenkoska, Svetlana Risteska, Maja Stefanovska, Sara Srebrenkoska, (2015), Mechanical properties of filament wound pipes: effect of winding angles, Quality of Life, 6 (1-2):10-15.

35) Risteska, S., Samakoski, B., & Stefanovska M. (2014). Properties of composite trapezoidal parts manufactured with help of filament winding technology using Taguchi method. International Journal of Engineering, Research & Technology. 3 (7), 250-255.

Листа на табели:

Табела 2.1. Споредба на механичките својства на комерцијално достапни зајакнувачи влакна

Табела 2.2. Класификација на композитните материјали

Табела 2.3. Типови на стаклени влакна

Табела 2.4. Состав на некои типови стаклени влакна (% теж.)

Табела 2.5. Физички и механички и особини на стаклени влакна

Табела 2.6. Споредбени карактеристики на различни јаглородни влакна

Табела 2.7. Особини на најлонските влакна

Табела 2.8. Типови на комерцијални арамидни влакна

Табела 2.9. Различни видови на епоксидни композити и процес на производство

Табела 3.1. Карактеристиките на компонентите на смолниот систем

Табела 3.2. Сооднос на компонентите

Табела 3.3. Карактеристики на смолниот систем

Табела 4.1. Димензии и агол на намотување на примероците

Табела 4.2. Масени и волуменски удели на конституентите во композитните примероци

Табела 4.3. Измерена густина на композитните примероци

Табела 4.4. Резултати за крајната јачина на истегнување од сплит-диск тестовите за композитните примероци

Табела 4.5. Средни вредности од сплит-диск тестовите за композитните

Листа на слики

Слика 2.1. Различни форми на зајакнувачки текстилен материјал

Слика 2.2. Влијание на карактеристичниот однос l/d на честичките на полнителот врз распределбата на напрегањата во матрицата: а- $l/d=1$, сферна честичка; б-кратко крто влакно, $l/d=10-1000$; с-бесконечно крто влакно, $l/d=\infty$

Слика 2.3. Шематски приказ на производство на јаглеродни влакна

Слика 2.4. а. Флексибилна полиакрилонитрилна молекула б. Крута скалеста (или ориентирана циклична) молекула

Слика 2.5. а. Дводимензионална репрезентација на јаглеродно влакно на основа на ПАН, б. Тридимензионална репрезентација на јаглеродно влакно на основа на ПАН

Слика 2.6. Структурна формула на најлон 6,6

Слика 2.7. Структурна формула на најлон 6

Слика 2.8. Хемиска структура: а) Поли (p- фенилен терефталамид) (PPD-T), б) Поли (m- фенилен изофталамид) (MPD-I) - , в) Поли (p-бензенамид) (PPBA)

Слика 2.9. Синтеза на PPTA од PPD и TCI

Слика 2.10. Синтеза на PPTA од PPD и терефтална киселина

Слика 2.11. Хемиски структури на некои од најчесто применуваните вмрежувачки агенси

Слика 2.12. Хемиски структури на функционални и мултифункционален епоксиди

Слика 2.13. Шематски приказ на процесот на намотување на филаменти

Слика 2.14. а) Спирално намотување на слоеви; б) Радијално намотување на слоеви; в) Поларно намотување на слоеви;

Слика 2.15. Шематски приказ на намотување на трапезен дел на компјутерски контролирана шест осна машина

Слика 2.16. Шематски приказ на можните оптоварувањата на цевчеста композитна структура добиена со примена на технологијата на намотување на филаменти

Слика 3.1. Постапка на намотување на влакна во лабораторијата на Институтот за современи композити и роботика во Прилеп

Слика 3.2. Изглед на добиените композитни цевки

Слика 3.3. Добивање на композитни прстен примероци

Слика 3.4. а) Алат за тестирање и б) композитен прстен примерок

Слика 3.5. Прстен примерок и алат заедно со прстенот за тестирање

Слика 3.6. Попречна површина со која се одредува крајното напрегање на истегнување

Слика 3.7. Универзална машина за тестирање

Слика 3.8. Скенирачки електронски микроскоп Tescan

Слика 4.1. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 10°

Слика 4.2. Сила – поместување криви од сплит диск тестовите добиени од универзалната машина за тестирање

Слика 4.3. Тестирање на композитни прстен примероци со агол на намотување на влакната 45° и 90°

Слика 4.5. Определување на модул на еластичност за комозитен примерок со ознака 1

Слика 4.6. Приказ на деструктуирани примероци со различен агол на намотување после испитувањето на јачина на истегнување

Слика 4.7. СЕМ микрофотографии на пукнатите делови од композитните прстен примероци